

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ



**DEFORMAČNÍ VLASTNOSTI PŘÍZÍ
PŘI VYSOKOFREKVENČNÍM NAMÁHÁNÍ**

**DEFORMATION BEHAVIOUR OF YARN
ON HIGH-FREQUENCY STRAIN**

LIBEREC 2011

Bc. MIROSLAVA PYTLOUNOVÁ

P r o h l á š e n í

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Beru na vědomí, že si svou diplomovou práci mohu vyzvednout v Univerzitní knihovně TUL po uplynutí pěti let po obhajobě.

V Liberci, dne 2. května 20011

.....

Podpis

Poděkování

Velmi ráda bych poděkovala všem, kteří mi pomohli s touto diplomovou prací. Především bych chtěla poděkovat Ing. Petru Tumajerovi a Ing. Evě Moučkové za jejich ochotu, cenné rady a za trpělivost, se kterou se mi věnovali.

Velké díky patří mé milované rodině, která mi pomohla jak po psychické tak i po materiální stránce. Též děkuji všem přátelům.

Anotace

Při zpracování je textilní materiál (détkové textilie) podroben různým režimům namáhání. Například během tkacího procesu dochází k cyklickému protahování osnovních nití s relativně vysokou frekvencí a právě popisem dynamicko-mechanických vlastností textilií a jejich experimentální analýzou při vysokofrekvenčním namáhání se zabývá tato diplomová práce.

Práce obsahuje dvě části: teoretickou část a experimentální část. Teoretická část pojednává o mechanických vlastnostech. Dále popisuje vliv frekvence protažení textilie na její deformační vlastnosti (reologické modely).

Experimentální část práce spočívá v prověření vlivu vysokofrekvenčního namáhání na deformační vlastnosti přízí z různých materiálů. V rámci experimentu jsou stanoveny a porovnány moduly pružnosti. Tyto moduly pružnosti jsou vypočteny z výsledků měření na přístroji *Instron 4411* a dále na přístroji *Vibtex*.

Annotation

Textile material (fabric length) is subjected to different stress regimes at its processing. For example, during the weaving process, warp threads are cyclical stretched with a relatively high frequency. This thesis is focused on the description of dynamic-mechanical properties of textiles and their experimental analysis at high frequency stress.

This work includes two parts: theoretical part and experimental part. Theoretical part deals with tensile properties. Next, there are described influence of frequency of textile elongation to its deformation properties (rheology models).

In the experimental part of this work, the influence of high stress on the deformation properties of yarn made from different materials is studied. Within the experiment, modulus of elasticity are determined and compared. These modulus of

elasticity are calculated from result of measurement realized on the Instron 4411 apparatus and the apparatus Vibtex.

Klíčová slova

Mechanické vlastnosti

Pevnost

Deformace

Frekvence

Dynamický modul pružnosti

Předpětí

VibTex

Keywords

Mechanical properties

Tenacity

Deformation

Frequency

Dynamics modulus elasticity

Prestress

VibTex

Obsah

1. ÚVOD.....	10
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	11
2.1. Mechanické vlastnosti.....	11
2.1.1 Rozdělení mechanických vlastností [2], [3].....	12
2.1.2 Definice základních pojmů	13
○ Pevnost.....	13
○ Deformace.....	14
○ Modul pružnosti.....	16
○ Úhlová frekvence.....	17
○ Předpětí	18
○ Cyklické namáhání	18
2.1.3 Stanovení mechanických vlastností	19
2.1.3.1 Popis přístroje <i>Instron 4411</i> a zařízení <i>VibTex</i>	19
○ Přístroj <i>Instron 4411</i>	19
○ Zařízení <i>VibTex</i>	19
2.1.3.2 Stanovení modulu pružnosti na základě statických zkoušek pevnosti	21
2.1.3.3 Způsoby stanovení modulů pružnosti na základě dat zjištěných při cyklickém namáhání na přístroji <i>VibTex</i>	23
2.1.3.3.1 Stanovení modulu pružnosti jako směrnice regresní přímky.....	23
2.1.3.3.2 Stanovení modulu pružnosti poměrem amplitudy odezvy a amplitudy budící funkce.....	24
○ Dynamický (komplexní) modul pružnosti.....	24
○ Ztrátový úhel (fázové posunutí).....	26

o	Elastický a ztrátový modul pružnosti.....	28
2.1.4	Charakteristika dynamicko-mechanických vlastností textilií na základě reologických modelů.....	30
2.1.4.1	Prvky reologických modelů.....	30
2.1.4.2	Popis reologických modelů s využitím L-transformace	31
2.1.4.3	Příklady reologických modelů.....	33
A)	Paralelní spojení pružného a viskózního členu (Kelvinův model).....	33
B)	Sériové spojení pružného a viskózního členu (Maxwellův model)	35
2.1.4.4	Teoretické modelování dynamicko-mechanických vlastností textilií	38
2.2	Statistické zpracování dat	40
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	41
3.1	Experimentální stanovení modulů pružnosti na základě zkoušky pevnosti	44
3.1.1	Analýza tahových křivek do přetrhu	44
3.1.2	Analýza tahových křivek do protažení 5 mm.....	46
3.2	Stanovení dynamických modulů pružnosti.....	49
3.2.1	Experimentální stanovení modulů pružnosti jako směrnice regresní přímky 50	
3.2.2	Experimentální stanovení modulů pružnosti poměrem amplitudy odezvy a amplitudy budící funkce	53
3.2.3	Vzájemné porovnání modulů pružnosti stanovených různým způsobem	55
3.3	Porovnání modulů pružnosti naměřených na zařízení <i>Instron</i> a <i>VibTex</i>	57
3.4	Vliv frekvence protažení na dynamický modul pružnosti	59
3.4.1	Porovnání dynamických modulů pružnosti a ztrátových úhlů	59
3.4.2	Porovnání dynamických, elastických a ztrátových modulů pružnosti	61
4.	ZÁVĚR.....	63
5.	POUŽITÁ LITERATURA.....	65

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol/zkratka	Jednotka	Význam
b		Konstanta viskózního tlumení
C	[N/m]	Komplexní modul pružnosti
C_{IM}	[N/m]	Ztrátový modul pružnosti
C_{RE}	[N/m]	Elastický modul pružnosti
CV	[%]	Kvadratická nestejnoměrnost
E	[Pa]	Modul pružnosti
F	[N]	Absolutní pevnost v tahu
$F(p)$		Laplaceův obraz odezvy
f	[Hz]	Frekvence
G	[N/m]	Tuhost pružiny
IS		95% interval spolehlivosti
K_{NT}	[N/m]	Modul pružnosti nitě (směrnice regresní přímky)
K_N	[N/m]	Modul pružnosti nitě (při protahování nitě)
K_P	[N/m]	Modul pružnosti nitě (při povolování nitě)
l	[mm]	Konečná délka po namáhání
Δl	[mm]	Absolutní deformace
l_0	[mm]	Upínací délka
ΔL_{max}	[mm]	Maximální protažení textilie
p		Laplaceův operátor
P	[N]	Pevnost
ΔQ_{max}	[mN]	Maximální změna tahové síly
R	[N/tex]	Poměrná pevnost v tahu
R^2		Koeficient determinace
R^2_{NT}	[-]	Koeficient determinace
s		Směrodatná odchylka
s^2		Výběrový rozptyl
S_e		Reziduální součet čtverců
S_t		Celkový součet čtverců

t	[s]	Čas
T	[tex]	Jemnost
$T(p)$		Přenos reologického modelu v operátorovém tvaru
U	[%]	Lineární nestejnoměrnost
Z_p	[m ⁻¹]	Zákrut přádní
Z_s	[m ⁻¹]	Zákrut skací
$x(p)$		Laplaceův obraz budící funkce
\bar{x}	[mm]	Průměr
$Y(p)$		Laplaceův obraz
$Y(\omega)$		Fourierova transformace
δ	[°]	Ztrátový úhel (fázové posunutí)
ε	[%]	Relativní deformace
σ	[Pa]	Napětí
ω	[rad/s]	Úhlová frekvence
<i>atd.</i>		A tak dále
<i>např.</i>		Například
<i>tj.</i>		To jest
<i>tzv.</i>		Tak zvaně

1. ÚVOD

Mechanické vlastnosti textilií jsou důležité z hlediska jejich zpracování v technologickém procesu i z hlediska jejich používání ve formě finálních výrobků. Chybějící exaktní matematický popis deformačních vlastností textilií komplikuje analýzu jejich chování při různém druhu namáhání a zatěžování. Při zpracování je textilní materiál (délkové textile) podroben různým režimům namáhání. Například během tkacího procesu dochází k cyklickému protahování osnovních nití s relativně vysokou frekvencí [1].

Tato diplomová práce se bude zabývat teoretickým popisem dynamicko-mechanických vlastností textilií a také jejich experimentální analýzou. V teoretické části budou popsány mechanicko-dynamické vlastnosti textilií na základě reologických modelů. Experimentální část bude popisovat speciální zařízení *VibTex*. Možnosti jeho využití při experimentální analýze dynamicko-mechanických vlastností textilií.

Hlavním cílem této práce bude prověřit vliv vysokofrekvenčního namáhání na deformační vlastnosti přízí z různých materiálů: polypropylen, viskóza, bavlna, polyester. V rámci práce budou stanoveny a porovnány moduly pružnosti. Tyto moduly pružnosti budou zjišťovány na přístroji *Instron 4411* a dále na přístroji *Vibtex*. Moduly pružnosti budou vyhodnocovány několika způsoby.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti popisují schopnost tělesa změnit tvar, případně také objem (tj. deformovat se) v důsledku působení vnějších sil. Vnější síla vyvolává v tělese napětí σ , což vede ke vzniku odpovídající deformace ε .

Při mechanickém namáhání nití dochází ke změně tvaru, k tzv. deformaci. Tato deformace je závislá na velikosti zatížení, rychlosti namáhání, době trvání. Mechanické vlastnosti jsou popisovány tzv. ultimativními (krajními) charakteristikami [2].

Ultimativní charakteristiky:

- pevnost P [N]
- napětí do přetrhu σ [Pa]
- protažení do přetrhu Δl [mm]
- tažnost (deformace) ε [%]
- relativní pevnost R [N/tex]
- tržná délka l_T [km]

Tržná délka je délka, při níž by se textilie zavěšená na jednom konci přetrhla vlastní tíhou.

2.1.1 Rozdělení mechanických vlastností [2], [3]

1) Nejobecnějším kritériem pro rozdělení mechanických vlastností je to, zda se uplatňuje v jejich popisu strukturní přístup či nikoliv. Z tohoto hlediska se rozlišují tzv.:

- **makromechanika** technických materiálů
- **mikromechanika** technických materiálů

Pokud se posuzují mechanické vlastnosti látky jako celku, hovoří se o makromechanice. Vlastnosti látky se popisují tak, jako by byla homogenním kontinuem, zanedbá se struktura látky.

U mikromechaniky se respektuje a přihlíží se ke struktuře látky, zejména k její různorodosti. Důsledný mikromechanický přístup by měl vycházet z rozložení atomů a molekul v látce a silového působení mezi nimi, tento přístup je však složitý.

2) Podle účinku vnějších sil se mechanické vlastnosti rozdělují:

a) deformační (které popisují průběh deformace materiálu):

- elastické
- viskoelastické
- plastické

U polymerních textilních materiálů se čistě elastické deformace prakticky nevyskytují, protože jsou doprovázeny viskózním tokem v amorfních oblastech. Deformace nevznikají okamžitě, ale postupně s dobou zatížení narůstají. Jsou vratné, ale ne okamžitě po odlehčení, nýbrž postupně v závislosti na době, uplynulé od odlehčení.

b) destrukční (např. pevnost, odolnost v oděru), které popisují mechanické poškození (destrukci) materiálu

3) Podle časového režimu namáhání jsou mechanické vlastnosti rozděleny:

a)

- statické (síla působí pomalu)
- jednorázové (do přetrhu)

b)

- dynamické (síla působí rychle)
- cyklické (bez přetrhu nebo do porušení nitě)

4) Podle stavu napjatosti se mechanické vlastnosti rozlišují:

a) při jednoosé napjatosti

b) při víceosé napjatosti

5) Podle způsobu namáhání (vyvolané působením) se mechanické vlastnosti rozdělují:

a) tahu

b) tlaku

c) smyku

d) ohybu

e) krutu

2.1.2 Definice základních pojmů

○ Pevnost

Pevnost patří k nejdůležitějším vlastnostem příze. Pevnost je maximální dosažitelná hodnota tahové síly.

Pevnost příze je určena pevností samotného vlákenného materiálu a také strukturálními faktory, zejména zákrutem, stupněm napřímění vláken, migrací vláken a dalšími vlivy.

Tuto vlastnost lze kvantitativně vyjádřit jako absolutní pevnost v tahu (mez pevnosti) a vyjadřuje se v jednotkách síly [N]. Vhodnějším použitím je tzv. poměrná pevnost [N/tex].

Pevnost příze se měří na trhačích přístrojích podle ČSN 80 0700 a zjišťuje se mezní odolnost příze proti účinku tahové síly [5].

Poměrná pevnost se vypočítá dle vztahu:

$$R = \frac{F}{T} \quad (1)$$

kde: R ... poměrná pevnost v tahu [N/tex]

F ... absolutní pevnost v tahu [N]

T ... jemnost příze [tex]

○ **Deformace**

Při namáhání nitě v tahu dochází k deformaci nitě. Absolutní deformace se vyjadřuje v jednotkách Δl [mm]. Aby bylo možné srovnávat deformace u různých druhů materiálů, je nutné deformace přepočítat na relativní jednotky [%]. Deformace může být vyjádřena také jako bezrozměrné číslo [-]. Vztahy pro přepočet deformace [2]:

Absolutní deformace Δl :

Působením deformačních sil se nit prodlouží z původní délky l_0 na délku l . Veličinu (rozdíl) $l - l_0$ nazýváme absolutní deformací (prodloužení):

$$\Delta l = l - l_0 \quad (2)$$

kde: Δl ... absolutní deformace [mm]

l ... konečná délka po namáhání [mm]

l_0 ... počáteční délka vzorku [mm], tzv. upínací délka

Relativní deformace ε :

Deformace (prodloužení) je závislé na počáteční délce l_0 nitě. Proto se zavádí veličina relativní deformace.

$$\text{a) } \varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (3)$$

kde: ε ... relativní deformace [-]

l ... konečná délka po namáhání [mm]

l_0 ... počáteční délka vzorku [mm], tzv. upínací délka

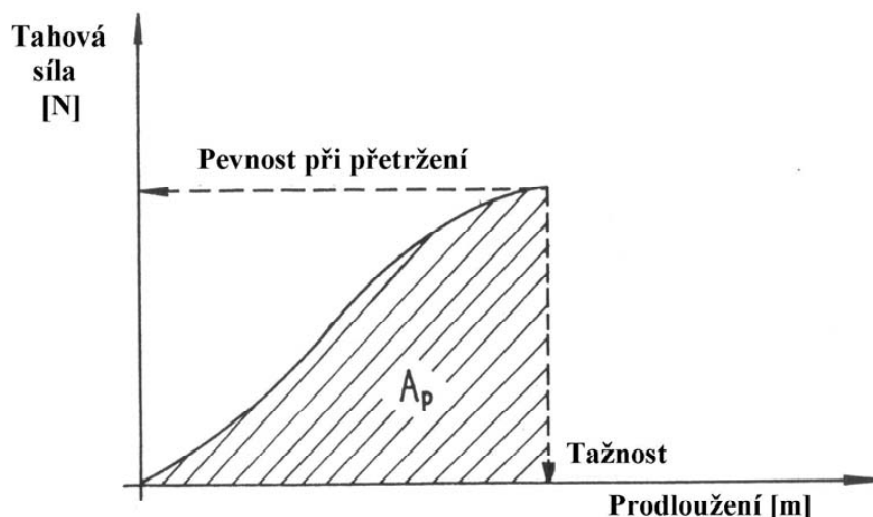
$$\text{b) } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} 10^2 \quad (4)$$

kde: ε ... relativní deformace [%]

Δl ... absolutní deformace [mm]

l_0 ... počáteční délka vzorku [mm], tzv. upínací délka.

Relativní deformaci do přetrhu nazýváme tažnost [%]. Zkoušky tažnosti probíhají zároveň se zkouškami pevnosti. Dále můžeme zjišťovat deformační práci do přetržení A_p . Velikost deformační práce je úměrná ploše pracovního diagramu mezi osou prodloužení a pracovní křivkou (obr. 1) [5].



Obr. 1 Pracovní křivka při tahovém namáhání [5]

○ Modul pružnosti

Při různých typech mechanických zkoušek můžeme stanovit různé moduly, např. modul v tahu, modul ve smyku, modul všestranného stlačení, relaxační modul, okamžitý modul.

Youngův modul: Čím je modul pružnosti vyšší, tím vyššího napětí je třeba k dosažení dané deformace. Obecně je modul pružnosti (Youngův modul) definovaný jako poměr aplikovaného napětí a vzniklé deformace:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5)$$

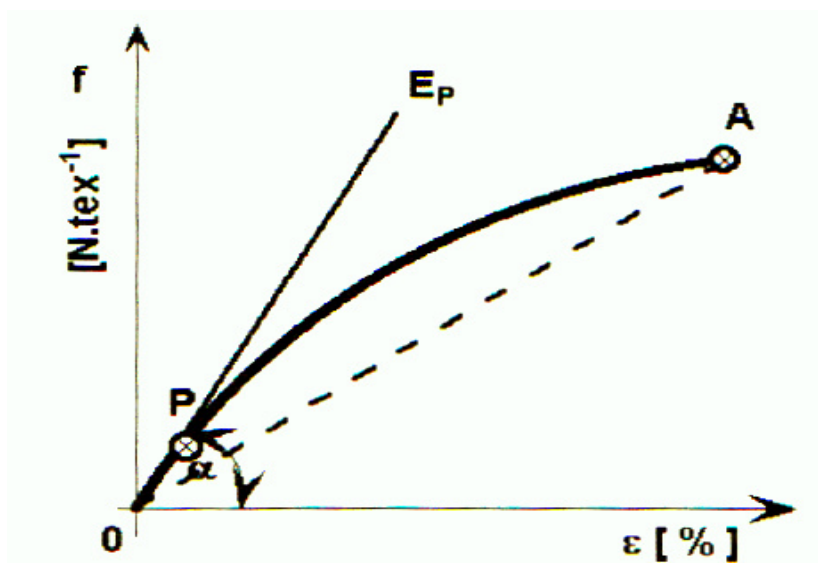
kde: E ... modul pružnosti [Pa]

σ ... napětí [Pa]

ε ... deformace [%]

Tato definice modulu pružnosti se u textilních struktur nedá použít. Neplatí totiž $\sigma = F/S$ [Pa], protože plocha průřezu příze není přesně definována. Modul pružnosti u textilií proto nelze definovat Youngovým modulem. Vychází se tedy z toho že, modul pružnosti je první derivací funkce tahové (pracovní) křivky, tzv. tečny ke křivce v počátku. Většinou je konstruována graficky, změří se úhel α a vypočítá se $\tan \alpha$.

Místo pojmu Youngův modul pružnosti se používá pojem počáteční tangentový modul E_p . Bod, kde tečna v počátku opouští tahovou křivku pak, definujeme jako mez pružnosti (bod P), jak je zobrazeno na obr. 2 [2].



Obr. 2 Charakteristický bod P na tahové křivce textilie pro určení počátečního tangentového modulu [2]

○ Úhlová frekvence

Úhlová frekvence vyjadřuje změnu úhlové dráhy za jednotku času. Pro rovnoměrný otáčivý pohyb lze úhlovou frekvenci vyjádřit vztahem:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (6)$$

kde: ω ... úhlová frekvence [rad/s]

f ... frekvence [Hz]

π ... matematická konstanta [-]

T ... perioda [s]

Mezi frekvencí f a periodou T platí vztah [4]:

$$f = \frac{1}{T} \quad (7)$$

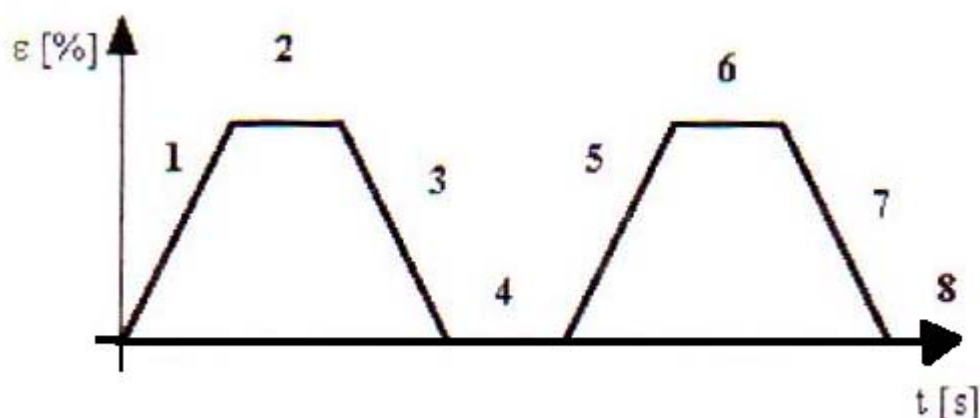
○ Předpětí

Pro přesné stanovení deformace nitě, která je závislá na změně délky a pro přesné odečtení počátečního tangentového modulu, se před měřením pevnosti vkládá na textilií počáteční síla, která se nazývá předpětí.

Předpětí se na nit vkládá např. tak, že se na nit zavěsí závažíčko. Moderní přístroje pro měření pevnosti a tažnosti jsou již zkonstruovány tak, že předpětí se zadává do programu číselně (např. 200 mN). Přístroj nejdříve nit zatíží na zadané předpětí a teprve pak začne měřit pevnost a tažnost [8].

○ Cyklické namáhání

Cyklické namáhání je definováno jako pravidelný vzrůst a pokles deformace a napětí doplněný prodlevami. Tento postup může být realizován do konstantní deformace (resp. síly) nebo se vzrůstající úrovní napětí, popřípadě až do přetrhu. Cyklické namáhání je zobrazeno na obr. 3 [8].



Obr. 3 Cyklické namáhání [8]

2.1.3 Stanovení mechanických vlastností

2.1.3.1 Popis přístroje *Instron 4411* a zařízení *VibTex*

○ Přístroj *Instron 4411*

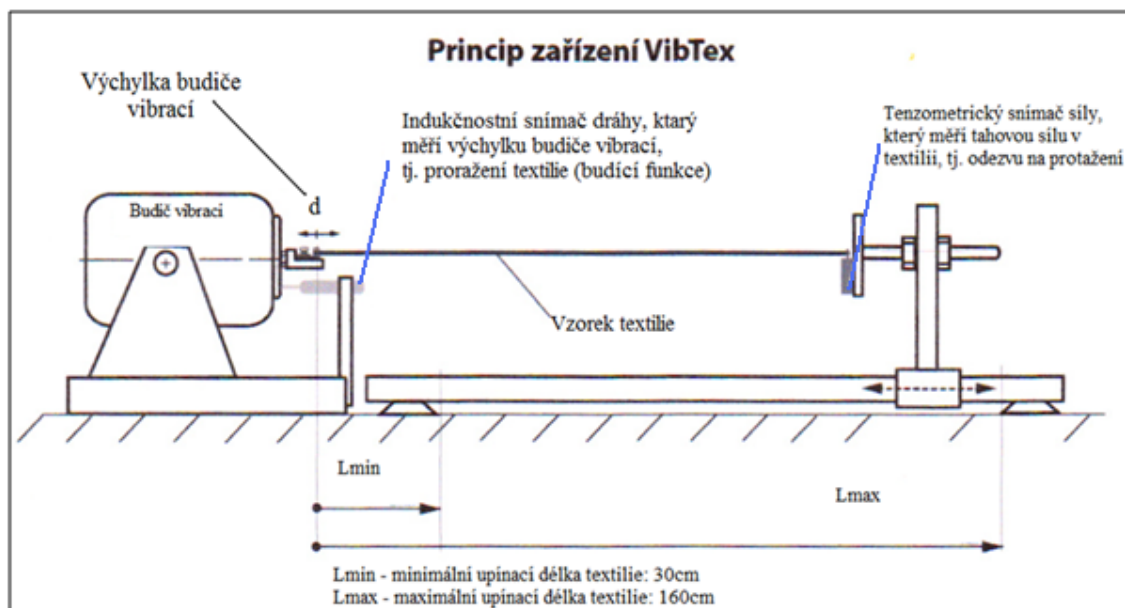
Přístroj je určený k zjišťování mechanických vlastností délkových a plošných textilií. Je možné měřit jednoosé namáhání tlakem, tahem a ohybem. Trhací přístroj má dvě čelisti, jedna čelist je pevná a druhá čelist se pohybuje konstantní rychlostí po celou dobu měření. Přístroj zaznamenává pevnost při přetrhu [N], prodloužení při přetrhu [mm] a další veličiny.

Měření proběhlo v souladu s ČSN 80 0700 (Zjišťování pevnosti v tahu a tažnosti jednotlivých nití).

○ Zařízení *VibTex*

Speciální zařízení pro testování textilií „VibTex“ (obr. 4), umožňuje experimentální analýzu deformačních vlastností textilií v širokém rozsahu upínacích délek a frekvencí. Základem tohoto zařízení je elektromagnetický vibrační systém a tenzometrický snímač. Elektromagnetický vibrační systém je schopen textilii protahovat různou frekvencí a tenzometrický snímač měří tahovou sílu v textilii, tedy odezvu na protažení. Vibrační systém je využit jako budič, který v textilii vytváří periodické (cyklické) protažení.

Zařízení *VibTex* nám umožňuje realizovat experimentální testy pro různé textilie, dále tento přístroj může být využit pro stanovení dynamických modulů pružnosti a ztrátových úhlů v širokém rozsahu frekvencí [10].



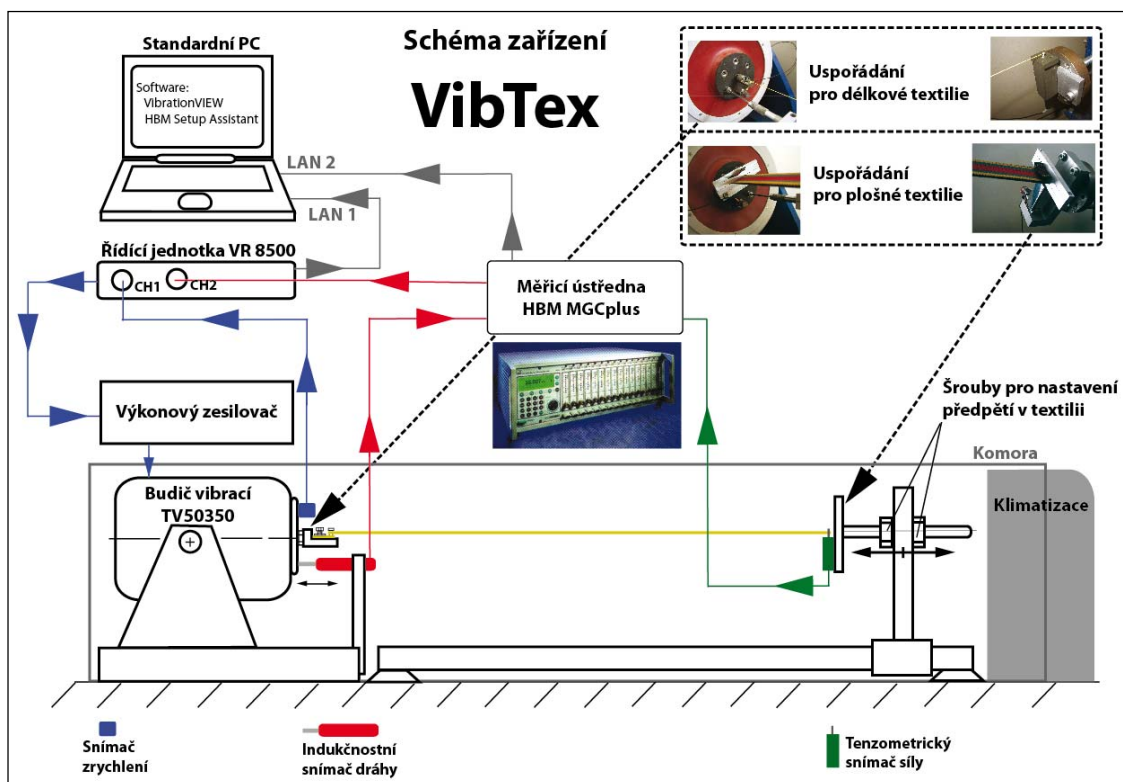
Obr. 4 Princip zařízení *VibTex* [10]

Rozsah upínacích délek a frekvencí je popsán v Tabulce 1.

Tab. 1 Rozsah upínacích délek a frekvencí

Požadované max. protažení textilie	Rozsah možných frekvencí protažení
25mm	5 až 15 Hz
10mm	5 až 40 Hz
4mm	5 až 100 Hz
1mm	5 až 200 Hz
Rozsah upínacích délek textilií	od 30 do 160 cm
Maximální tahová síla v textilií	5 N pro délkové textilie

Zařízení *VibTex* umožňuje nastavit požadované předpětí ve vzorku textilie pomocí stavěcích šroubů integrovaných na držáku tenzometrického snímače. Požadované klimatické podmínky (teplota a relativní vlhkost) jsou během testů udržovány pomocí klimatizační jednotky a zvlhčovače vzduchu. Kompletní schéma zařízení *VibTex* je znázorněno na obrázku číslo 5 (11).

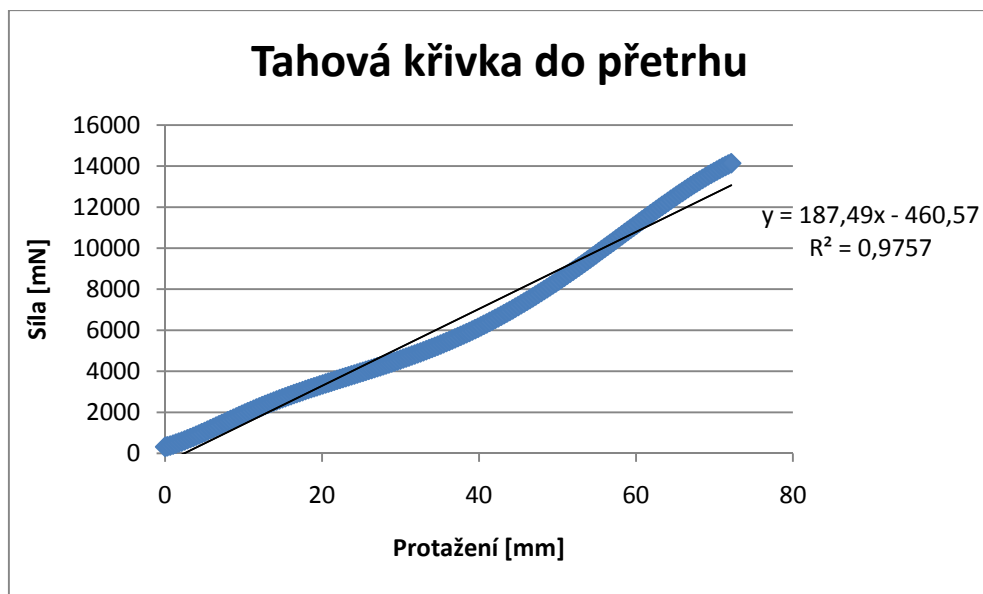


Obr. 5 Kompletní schéma zařízení *VibTex* [11]

2.1.3.2 Stanovení modulu pružnosti na základě statických zkoušek pevnosti

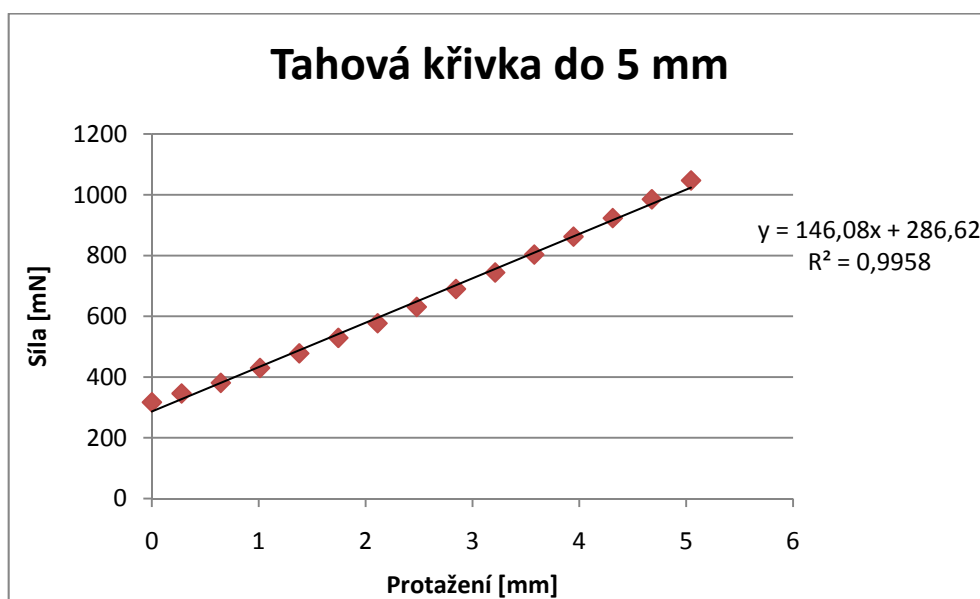
Obecně lze modul pružnosti stanovit jako směrnici regresní přímky tahové křivky. Tahovou křivku lze získat na základě statických zkoušek, i na základě cyklických zkoušek. Cyklické zkoušky mohou být realizovány jak na přístroji *Instron 4411*, tak pomocí přístroje *VibTex*.

Jedním z výstupů přístroje *Instron 4411* (viz. 2.1.3.1) jsou tahové křivky, tj. závislost tahové síly (odezvy) na protažení (budící funkce). Metodou nejmenších čtverců je naměřenými daty proložena přímka $y = K_{NT} \cdot x + q$. Symbol x zde představuje protažení nitě a symbol K_{NT} zde představuje směrnici regresní přímky, tj. modul pružnosti nitě. Dále je vypočten koeficient determinace R^2_{NT} , který vyjadřuje „míru linearity“ deformačních vlastností dané délkové textilie až do přetrhu (obr. 6).



Obr. 6 Tahová křivka do přetrhu a její regresní přímka pro 100% PL přízi

Deformační vlastnosti délkové textilie mohou být analyzovány při deformacích do 5 mm. Z tahové křivky jsou vybrána pouze data, která odpovídají protažení nitě do 5 mm, těmito daty je proložena regresní přímka $y = K_N \cdot x + q$ a je vypočten koeficient determinace R^2_N . Symbol K_N zde představuje směrnici regresní přímky, tj. modul pružnosti nitě při její deformaci do 5 mm (obr. 7).

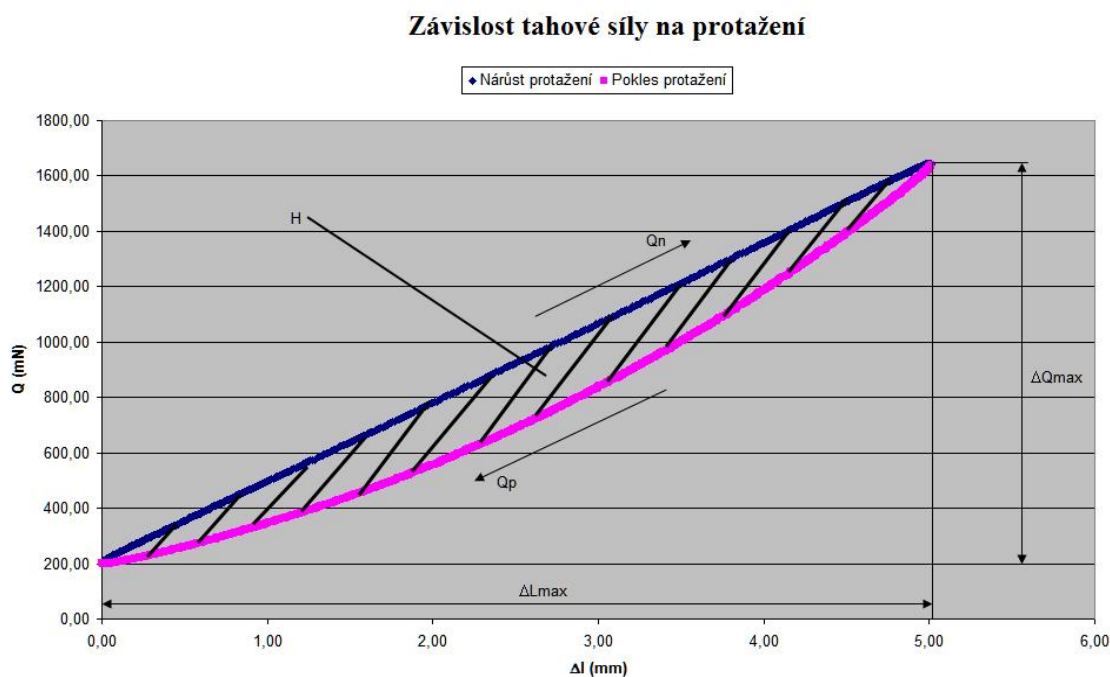


Obr. 7 Tahová křivka do 5mm a její regresní přímka pro 100% PL přízi

2.1.3.3 Způsoby stanovení modulů pružnosti na základě dat zjištěných při cyklickém namáhání na přístroji *VibTex*.

2.1.3.3.1 Stanovení modulu pružnosti jako směrnice regresní přímky

Jedním z výstupů přístroje *VibTex* (viz. 2.1.3.1) je závislost tahové síly na protažení při protahování i povolování nitě (obr. 8).



Obr. 8 Závislost tahové síly na protažení při protahování i povolování nitě

Takto realizovaná měření umožňují stanovit modul pružnosti jako směrnici regresní přímky při protahování ($y=K_N \cdot x+q$) i povolování nitě ($y=K_P \cdot x+q$).

2.1.3.3.2 Stanovení modulu pružnosti poměrem amplitudy odezvy a amplitudy budící funkce

Stanovení modulů pružnosti poměrem amplitudy odezvy a amplitudy budící funkce bude provedeno pomocí programu *VibTexSoft*. Tento program zpracovává data podle následujících vztahů:

○ Dynamický (komplexní) modul pružnosti

Dynamický modul pružnosti C se stanoví jako poměr amplitudy proměnlivé složky odezvy a amplitudy proměnlivé složky budící funkce (obr. 9, 10):

$$C = \frac{\Delta Q_{max}}{\Delta L_{max}} \quad (8)$$

kde: C ... komplexní modul pružnosti [N/m]

ΔQ_{max} ... maximální změna tahové síly [mN]

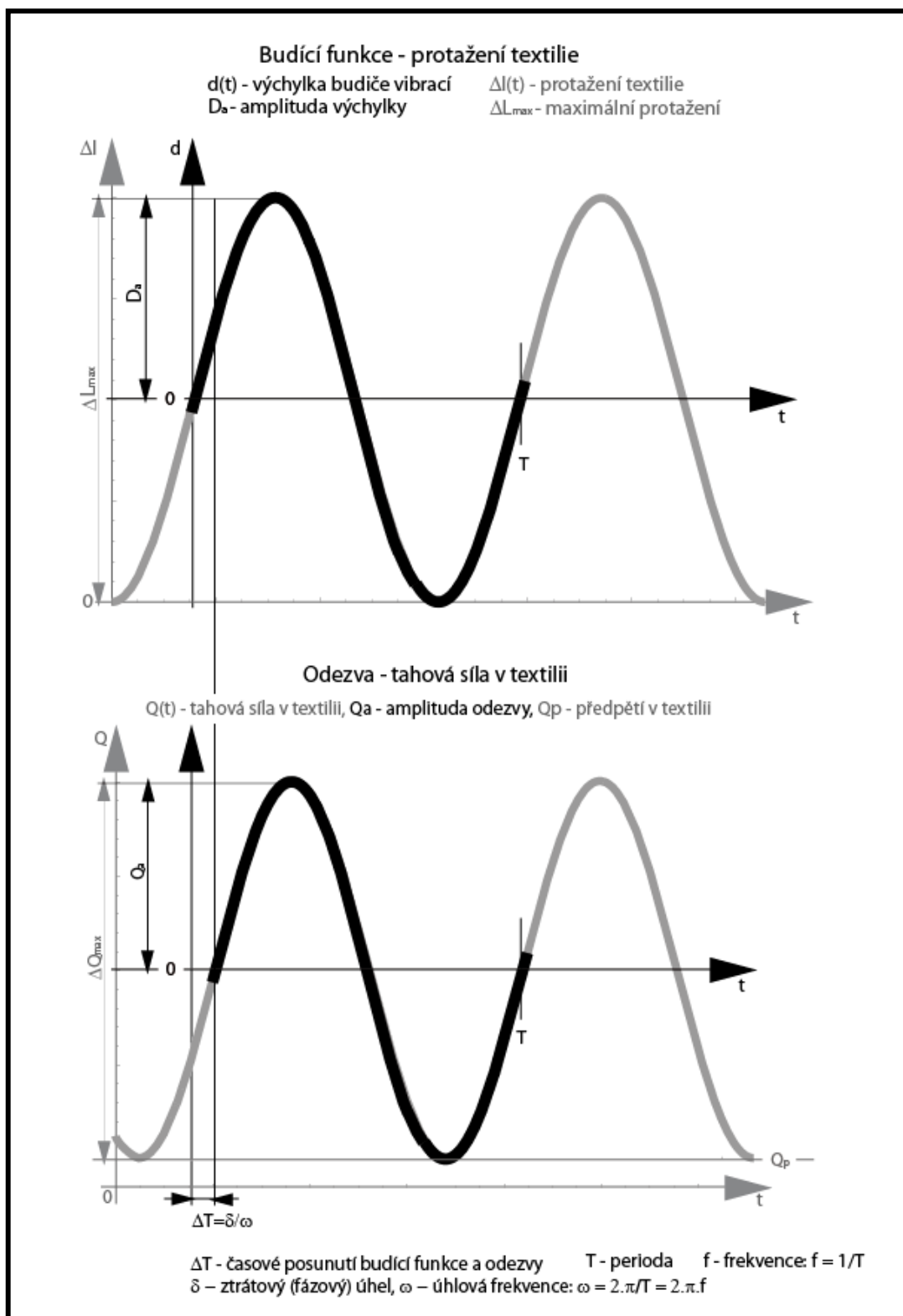
ΔL_{max} ... maximální protažení textilie [mm]

$$\Delta L_{max} = 2 \cdot D_a \quad (9)$$

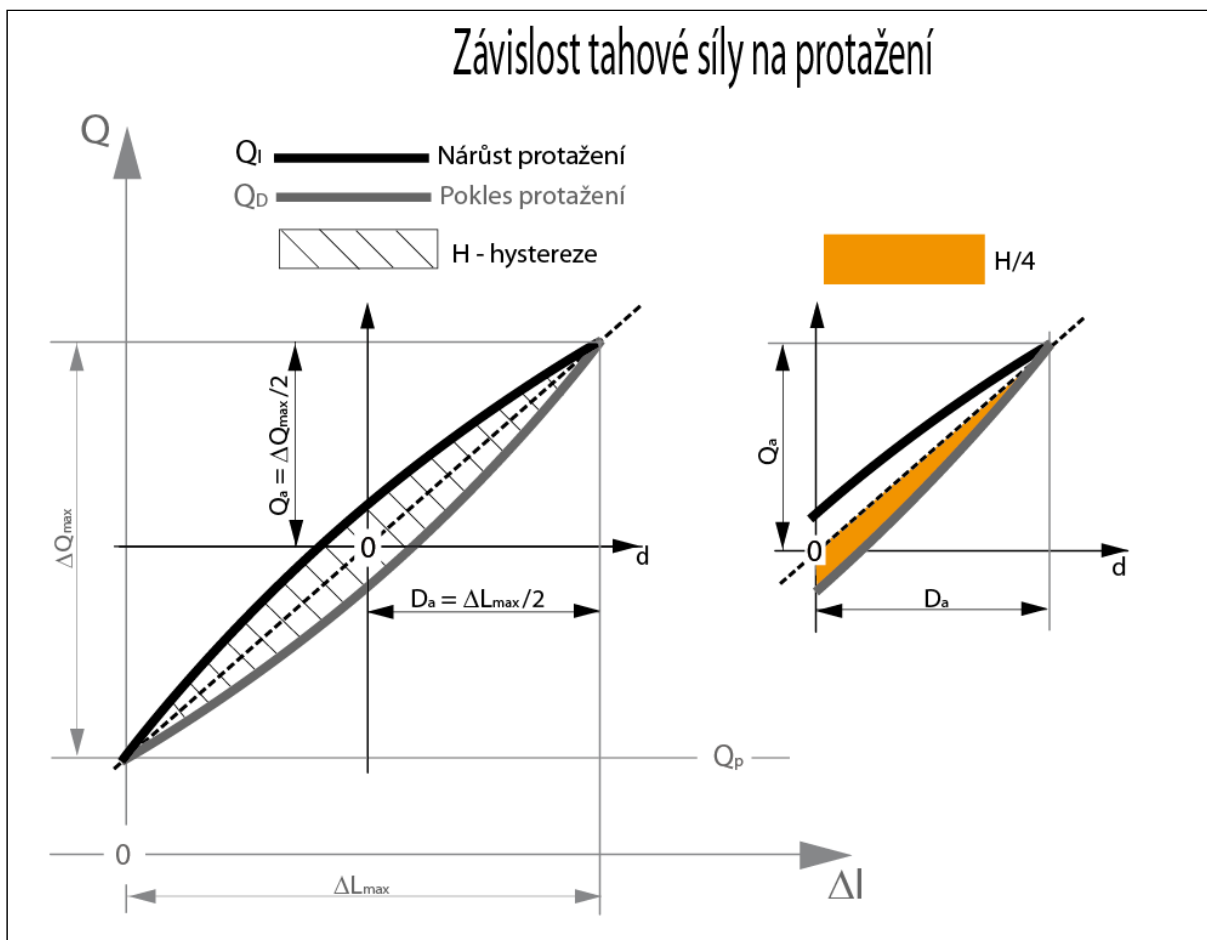
kde: D_a ... amplituda výchylky budiče vibrací [mm]

$$\Delta Q_{max} = 2Q_a \quad (10)$$

kde: Q_a ... amplituda odezvy, tj. tahové síly [mN]



Obr. 9 Časová závislost protažení textilie (budící funkce) a tahové síly (odezva)



Obr. 10 Závislost tahové síly na protažení

○ Ztrátový úhel (fázové posunutí)

Ztrátový úhel je vyjádřen pomocí energie v jedné čtvrtině periody, tj. v časovém intervalu od 0 do $T/4$, ve kterém dojde k protažení textlie o hodnotu $L_{1/4}$. Jedna čtvrtina periody může být vyjádřena s využitím rovnice (6) tímto vztahem:

$$T/4 = \frac{\pi}{2\omega} \quad (11)$$

Energie v jedné čtvrtině periody W je poté dána integrálem:

$$\begin{aligned}
 W &= \int_0^{L_1/4} Q_H \cdot d\Delta l_H = \int_0^{\frac{\pi}{2\omega}} Q_H \cdot \frac{d\Delta l_H}{dt} \cdot dt = \int_0^{\frac{\pi}{2\omega}} Q_a \cdot \sin(\omega t + \delta) \cdot D_a \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \cdot dt = \\
 &= \frac{1}{4} Q_a \cdot D_a \cdot [2 \cdot \cos(\delta) + \pi \cdot \sin(\delta)] = Q_a \cdot D_a \cdot \left[\frac{\cos(\delta)}{2} + \frac{\pi \cdot \sin(\delta)}{4} \right] \quad (12)
 \end{aligned}$$

Ze vztahu číslo (10) je zřejmé, že energie v jedné čtvrtině periody W , může být vyjádřena součtem dvou členů:

$$W = W_s + W_L \quad (13)$$

kde: W_s ... akumulovaná energie

W_L ... ztrátová energie

$$W_s = \frac{1}{2} Q_a \cdot D_a \cdot \cos(\delta) \quad (14)$$

$$W_L = \frac{\pi}{4} Q_a \cdot D_a \cdot \sin(\delta) \quad (15)$$

kde: Q_a ... amplituda odezvy, tj. tahové síly [mN]

D_a ... amplituda výchylky budiče vibrací [mm]

Z naměřených hodnot se vypočte rozptyl energie (hystereze H obr. 10) během jedné periody:

$$H = \int_0^{\Delta Q_{\max}} Q_I(\Delta l) d\Delta l - \int_0^{\Delta Q_{\max}} Q_D(\Delta l) d\Delta l \quad (16)$$

kde: Q_I ... tahová síla při nárůstu protažení [mN]

Q_D ... tahová síla při poklesu protažení [mN]

Výše uvedený integrál (16) je řešen numericky a následně je vypočten rozptyl energie během jedné čtvrtiny periody: $H/4$. Rozptyl energie v jedné čtvrtině periody je vyjádřen vztahem (15) a proto platí rovnost:

$$\frac{\pi}{4} \cdot Q_a \cdot D_a \cdot \sin(\delta) = \frac{1}{4} H \quad (17)$$

Z rovnice (17) se vyjádří ztrátový úhel δ :

$$\delta = \arcsin \frac{H}{\pi \cdot Q_a \cdot D_a} \quad (18)$$

S využitím vztahů (9) a (10) můžeme tento úhel δ vyjádřit pomocí hystereze H , maximálního protažení textilie ΔL_{max} a maximální změny tahové síly v textili ΔQ_{max} touto rovností:

$$\delta = \arcsin \frac{4 \cdot H}{\pi \Delta Q_{max} \cdot \Delta L_{max}} \quad (19)$$

kde: H ... hystereze

ΔQ_{max} ... maximální protažení textilie [mm]

ΔL_{max} ... maximální změna tahové síly [mN]

Hystereze H vyjadřuje rozptyl energie v textilii během jedné periody.

○ **Elastický a ztrátový modul pružnosti**

Elastický modul pružnosti C_{Re} (obr. 11) představuje reálnou část dynamického (komplexního) modulu pružnosti C (viz. rovnice (8)) a je mírou ideální odolnosti vůči mechanickému namáhání, shodnou s fází namáhání:

$$C_{Re} = C \cdot \cos(\delta) \quad (20)$$

kde: C_{Re} ... elastický modul pružnosti, tj. reálná část dynamického modulu [N/m]

C ... komplexní modul pružnosti [N/m]

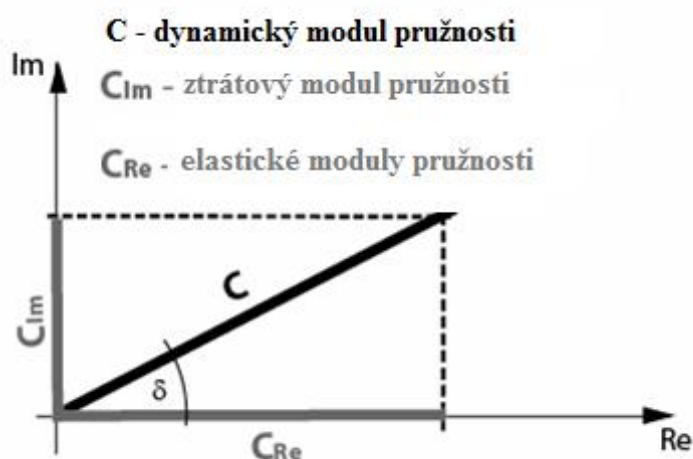
Ztrátový modul pružnosti C_{Im} (obr. 11) představuje imaginární část dynamického (komplexního) modulu pružnosti C a je mírou mechanických ztrát během jedné periody, fázově posunutý o hodnotu $\pi/2$ [1, 6, 12]:

$$C_{IM} = C \cdot \sin(\delta) \quad (21)$$

kde: C_{IM} ... ztrátový modul pružnosti, tj. imaginární část dynamického modulu [N/m]

C ... komplexní modul pružnosti [N/m]

Na obrázku 11 je znázorněn dynamický modul pružnosti, jeho reálná a imaginární složka.



Obr. 11 Dynamický modul pružnosti, jeho reálná a imaginární složka [6]

2.1.4 Charakteristika dynamicko-mechanických vlastností textilií na základě reologických modelů

Reologie se zabývá studiem deformací hmoty. Jedním z hlavních úkolů je nalezení vztahů mezi napětím, deformací a rychlostí deformace pro jednotlivé druhy látek.

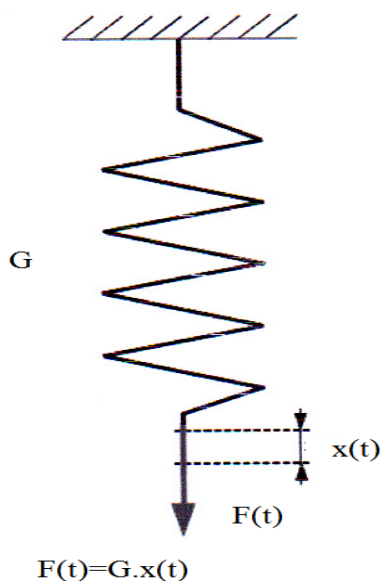
Reologické vlastnosti textilních materiálů mají vliv na stabilitu tvaru, na rozměr textilních výrobků při jejich praktickém používání. Rozhodují o velikosti zbytkových deformací v návinech na cívkách a ve svých důsledcích rozhodují např. i o pružovitosti při barvení.

Reologické modely jsou náhradní mechanické modely, složené z mechanických prvků, které přibližně popisují chování reálných materiálů [3].

2.1.4.1 Prvky reologických modelů

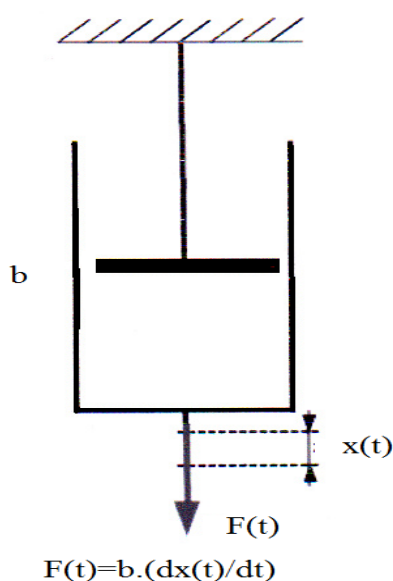
Pro popis lineárního viskoelastického chování jsou základními prvky reologických modelů:

- a. Ideální pružina (Elastický element)



Obr. 12 Ideální pružina [1]

- b) Ideální tlumič (Viskózní element)



Obr. 13 Ideální tlumič [1]

K deformaci pružiny (viz. obr. 12) v důsledku působení síly F dochází okamžitě. Veškerá energie, vynaložená na elastickou deformaci pružiny se v pružině akumuluje. Po odlehčení se akumulovaná energie spotřebuje na návrat pružiny do původního, nedeformovaného stavu.

Reologické modely se mohou vytvářet z reologických elementů dvojitým způsobem, a to sériovým nebo paralelním spojováním těchto elementů. Při sériovém spojení jsou napětí na jednotlivých elementech stejná a sčítají se deformace a jejich rychlosti. Jsou-li elementy spojené paralelně, pak jsou na jednotlivých elementech stejné deformace a rychlosti deformace a sčítají se napětí [3, 13].

2.1.4.2 Popis reologických modelů s využitím L-transformace

Reologické modely obsahující elastické a viskózní elementy je možné obecně popsat soustavou lineárních diferenciálních rovnic s konstantními koeficienty a pro teoretický popis dynamicko-mechanických vlastností využít Laplaceovu transformaci. Vzájemný vztah mezi odezvou F (tahovou silou v textilií) a budicí funkcí x (protažením textilie) je potom možné vyjádřit pomocí přenosových rovnic tohoto typu:

$$F(p) = T(p) \cdot x(p) \quad (22)$$

kde: $F(p)$... Laplaceův obraz odezvy

$T(p)$... přenos reologického modelu v operátorovém tvaru

$x(p)$... Laplaceův obraz budicí funkce

p ... Laplaceův operátor (komplexní parametr)

Laplaceův obraz $Y(p)$ funkce $y(t)$ je definován integrálem:

$$Y(p) = \int_0^{\infty} y(t) \cdot e^{-p \cdot t} \cdot dt \quad (23)$$

Vztah pro jednostrannou Fourierovu transformaci integrálem:

$$Y(\omega) = \int_0^{\infty} y(t) \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot t} \cdot dt \quad (24)$$

Z rovností (23) a (24) je zřejmé, že jejich pravé strany se přesně shodují za předpokladu ryze imaginární proměnné p :

$$p = i \cdot \omega \quad (25)$$

Je tedy možné konstatovat, že v případě existence Laplaceova obrazu funkce $y(t)$, existuje i její jednostranná Fourierova transformace a veškeré její vlastnosti je možné získat z Laplaceova obrazu $Y(p)$ záměnou operátoru p za ryze imaginární proměnnou $i \cdot \omega$.

Tato vlastnost bude využita při vyjádření frekvenčních přenosů (závislosti dynamickým modulů na frekvenci) a fázových posuvů (závislosti ztrátových úhlů na frekvenci) jednotlivých reologických modelů. Vyjádříme-li přenos $T(p)$ v *operátorovém* tvaru, je s využitím vztahu (25) určen i frekvenční přenos $T(i \cdot \omega)$.

Jestliže frekvenční přenos $T(i \cdot \omega)$ bude rozložen na reálnou $Re[T(i \cdot \omega)]$ a imaginární $Im[T(i \cdot \omega)]$ část, může být modul pružnosti $C(\omega)$ vyjádřen tímto vztahem:

$$C(\omega) = \sqrt{(\text{Re}[T(i \cdot \omega)])^2 + (\text{Im}[T(i \cdot \omega)])^2} \quad (26)$$

a vzájemné fázové posunutí mezi budící funkcí a odezvou (ztrátový úhel) tímto vztahem:

$$\delta = \arctg \frac{\text{Im}[T(i \cdot \omega)]}{\text{Re}[T(i \cdot \omega)]} \quad (27)$$

Tato vlastnost bude využita při vyjádření frekvenčních přenosů (závislosti dynamických modulů na frekvenci) [9, 13].

Při sestavení operátorových rovnic reologických modelů bude použit Laplaceův obraz funkce $y(t)$:

$$L\{y(t)\} = Y(p) \quad (28)$$

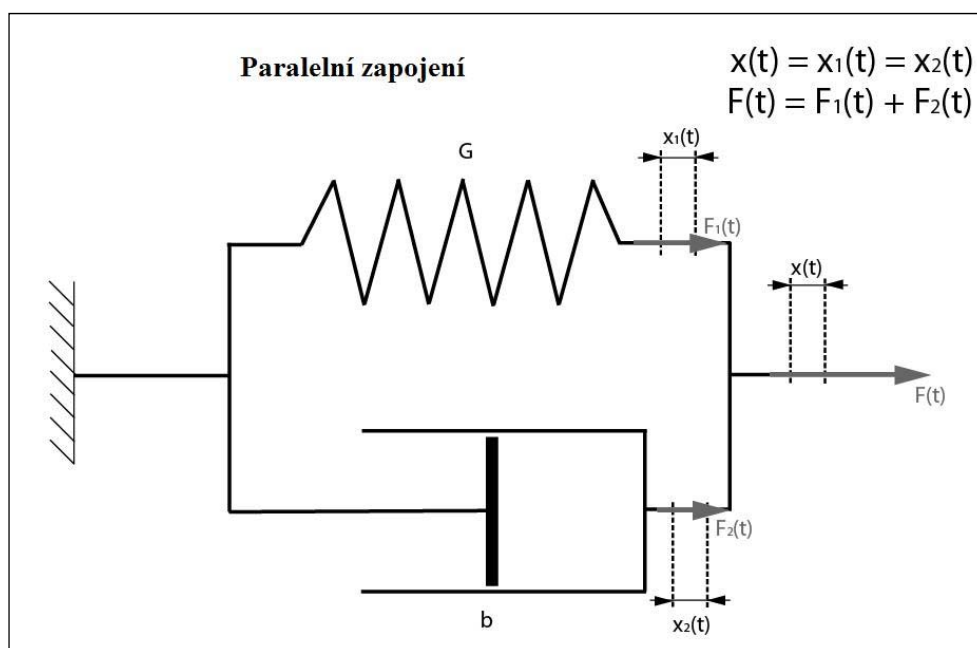
Dále bude použit Laplaceův obraz první derivace funkce $dy(t)/dt$ pro nulovou počáteční podmínku:

$$L\left\{\frac{dy(t)}{dt}\right\} = p.Y(p) \quad (29)$$

2.1.4.3 Příklady reologických modelů

A) Paralelní spojení pružného a viskózního členu (Kelvinův model)

Paralelním spojením elastického a viskózního členu získáme Kelvinův model (obr. 14).



Obr. 14 Paralelní zapojení pružného a viskózního členu

- Rovnice v operátorovém tvaru:

$$F_1(p) = G.x(p), \quad (30)$$

$$F_2(p) = b.p.x(p), \quad (31)$$

$$F(p) = F_1(p) + F_2(p). \quad (32)$$

Přenosová rovnice vyjádřená vyloučením F_1 a F_2 ze soustavy rovnic (30) až (32):

$$F(p) = [G + b.p].x(p) = T(p).x(p). \quad (33)$$

- Frekvenční přenos:

$$T(i.\omega) = G + b.i.\omega \quad (34)$$

- Reálná část frekvenčního přenosu (elastický modul pružnosti):

$$\operatorname{Re}[T(i.\omega)] = G \quad (35)$$

- Imaginární část frekvenčního přenosu (ztrátový modul pružnosti):

$$\operatorname{Im}[T(i.\omega)] = b.\omega \quad (36)$$

- Dynamický modul (jeho závislost na frekvenci):

$$C(\omega) = \sqrt{G^2 + (b.\omega)^2} \quad (37)$$

- Modul pro nízké frekvence, tj. $\omega \rightarrow 0$ (statický modul pružnosti):

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} [C(\omega)] = G \quad (38)$$

- Modul pro vysoké frekvence, tj. $\omega \rightarrow \infty$:

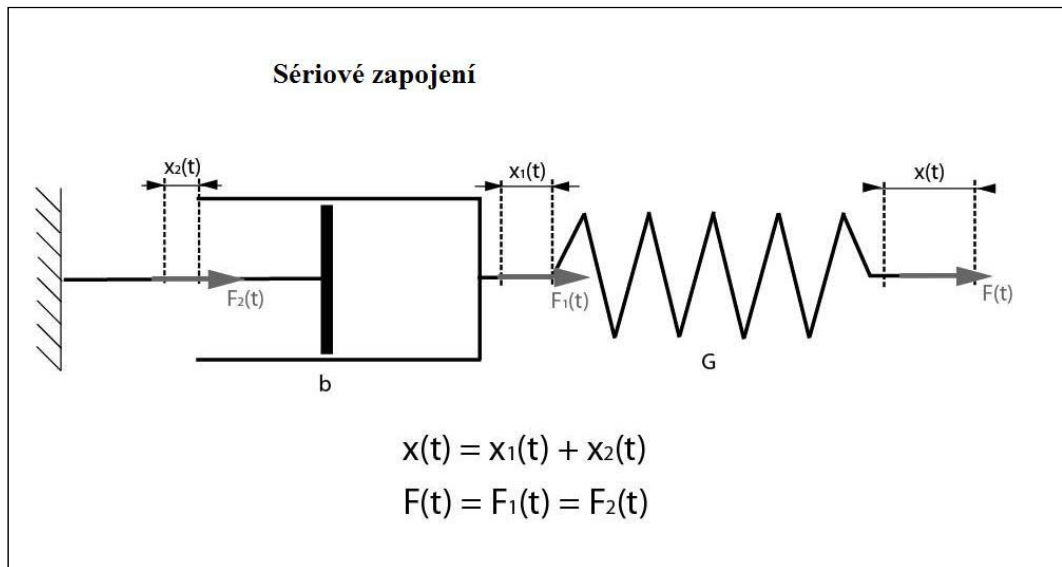
$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} [C(\omega)] = \infty \quad (39)$$

- Ztrátový úhel (závislost fázového posunutí na frekvenci):

$$\delta(\omega) = \arctg \frac{b.\omega}{G} \quad (40)$$

B) Sériové spojení pružného a viskózního členu (Maxwellův model)

Maxwellův model představuje sériově spojený elastický a viskózní člen (obr. 15).



Obr. 15 Sériové zapojení pružného a viskózního členu

- Rovnice v operátorovém tvaru:

$$F(p) = G \cdot x_1(p) \quad (41)$$

$$F(p) = b \cdot p \cdot x_2(p) \quad (42)$$

$$x(p) = x_1(p) + x_2(p) \quad (43)$$

Z rovnice (43) vypočteme $x_2(p)$ a dosadíme do rovnice (42):

$$F(p) = b \cdot p \cdot [x(p) - x_1(p)] \quad (42.1)$$

Z rovnice (41) vypočteme $x_1(p)$ a dosadíme do rovnice (42.1):

$$F(p) = b \cdot p \left[x(p) - \frac{F(p)}{G} \right]$$

$$F(p) = b \cdot p \cdot x(p) - \frac{b \cdot p}{G} \cdot F(p)$$

$$F(p) + F(p) \cdot \frac{b \cdot p}{G} = b \cdot p \cdot x(p)$$

$$F(p) \left[1 + \frac{b}{G} \cdot p \right] = b \cdot p \cdot x(p)$$

$$F(p) = \frac{b \cdot p}{1 + \frac{b}{G} \cdot p} \cdot x(p)$$

Přenosová rovnice vyjádřená vyloučením x_1 a x_2 ze soustavy rovnic (41) až (43):

$$F(p) = \left[\frac{b \cdot p}{1 + \frac{b}{G} \cdot p} \right] \cdot x(p) = T(p) \cdot x(p) \quad (44)$$

○ Frekvenční přenos:

$$T(i\omega) = \frac{b \cdot i\omega}{1 + \frac{b}{G} \cdot i\omega} \quad (45)$$

Vyjádření reálné a imaginární části frekvenčního přenosu:

$$\frac{b \cdot i\omega}{1 + \frac{b}{G} \cdot i\omega} \cdot \frac{1 - \frac{b}{G} \cdot i\omega}{1 - \frac{b}{G} \cdot i\omega} = \frac{\frac{b^2}{G} \cdot \omega^2 + b \cdot \omega \cdot i}{1 + \left(\frac{b}{G} \right)^2 \cdot \omega^2}$$

- Reálná část frekvenčního přenosu (elastický modul pružnosti):

$$\operatorname{Re}[T(i.\omega)] = \frac{\frac{b^2}{G}.\omega^2}{1 + \left(\frac{b}{G}\right)^2.\omega^2} \quad (46)$$

- Imaginární část frekvenčního přenosu (ztrátový modul pružnosti):

$$\operatorname{Im}[T(i.\omega)] = \frac{b.\omega}{1 + \left(\frac{b}{G}\right)^2.\omega^2} \quad (47)$$

- Dynamický modul (jeho závislost na frekvenci):

$$C(\omega) = \sqrt{\frac{b^4.\omega^4}{G^2.\left(1 + \frac{b^2}{G^2}.\omega^2\right)^2} + \frac{b^2.\omega^2}{\left(1 + \frac{b^2}{G^2}.\omega^2\right)^2}} = \sqrt{\frac{(b.G.\omega)^2}{G^2 + b^2.\omega^2}} = \sqrt{\frac{b^2.\omega^2}{1 + \left(\frac{b}{G}\right)^2.\omega^2}} \quad (48)$$

- Modul pro nízké frekvence, tj. $\omega \rightarrow 0$ (statický modul pružnosti):

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} [C(\omega)] = 0 \quad (49)$$

- Modul pro vysoké frekvence, tj. $\omega \rightarrow \infty$:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} [C(\omega)] = G \quad (50)$$

- Ztrátový úhel (závislost fázového posunutí na frekvenci):

$$\delta(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{b.\omega}{\frac{b^2}{G}.\omega^2} = \operatorname{arctg} \frac{G.b}{b^2.\omega} \quad (51)$$

2.1.4.4 Teoretické modelování dynamicko-mechanických vlastností textilií

Textilie představují viskoelastické materiály, pro jejich popis můžeme využít vzájemnou kombinaci elastických (pružných) a viskózních elementů. Vzájemnou kombinací elastických a viskózních elementů lze vytvářet reologické modely s různými dynamicko-mechanickými charakteristikami. Tyto vlastnosti je možné definovat na základě odezvy reologických modelů na harmonickou budící funkci (harmonické protažení textilie):

$$x(t) = X \sin \omega t \quad (52)$$

kde: x ... protažení (deformace) elementu

X ... amplituda protažení

ω ... úhlová frekvence [rad/s]

t ... čas [s]

Jestliže je elastický element (obr. 12) s modulem tuhosti G protahován harmonicky, vyvolá toto protažení odezvu v podobě síly F s harmonickým průběhem:

$$F(t) = G \cdot x(t) = G \cdot X \cdot \sin \omega t \quad (53)$$

kde: F ... síla

x ... protažení (deformace) elementu

X ... amplituda protažení

ω ... úhlová frekvence

t ... čas

G ... modul tuhosti

V případě viskózních elementů (obr. 13) je síla úměrná rychlosti protažení a proto je v tlumiči s konstantou viskózního tlumení b vytvořená síla F :

$$F(t) = b \cdot \frac{dx(t)}{dt} = b \cdot X \cdot \omega \cdot \cos \omega t \quad (54)$$

kde: F ... síla

b ... konstanta viskózního tlumení

X ... amplituda protažení

ω ... úhlová frekvence

t ... čas

G ... modul tuhosti

V případě elastického elementu je odezva ve fázi s budící funkcí a její amplituda je nezávislá na frekvenci.

V případě viskózního elementu je odezva fázově posunuta o hodnotu $\pi/2$ vůči budící funkci a její amplituda je závislá na frekvenci. Proto můžeme vzájemnou kombinací elastických a viskózních elementů vytvářet reologické modely, které popisují různé závislosti dynamických modulů a fázových posuvů na frekvenci [1].

2.2 Statistické zpracování dat

Ke statistickému zpracování naměřených dat byly použity níže uvedené vztahy:

Průměrná hodnota

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (55)$$

Výběrový rozptyl

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (56)$$

Směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{s^2} \quad (57)$$

Koeficient determinace [7]

$$R^2 = 1 - \frac{S_e}{S_t} \quad (58)$$

kde: S_e ... reziduální součet čtverců

S_t ... celkový součet čtverců

Reziduálním součtem čtverců S_e rozumíme minimální hodnotu součtu čtverců S při odhadování parametrů regresního modelu pomocí metody nejmenších čtverců.

95 % interval spolehlivosti

$$IS = \bar{x} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-1) \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (59)$$

kde: t ... kvantil Studentova rozdělení

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem této práce je:

- Na speciálním zařízení *VibTex* prověřit vliv vysokofrekvenčního namáhání na deformační vlastnosti přízí z různých materiálů
- Na přístroji *Instron 4411* prověřit deformační vlastnosti délkových textilií při statickém zatěžování (zkouška pevnosti)
- Porovnat moduly pružnosti stanovené na základě standardní zkoušky pevnosti na přístroji *Instron 4411* a na základě speciálních testů na přístroji *VibTex*.

Testovanými materiály jsou příze (viz. tabulky: 2, 3, 4, 5).

Tab. 2 Bavlna (CO)

100% bavlna (CO) o jemnosti 20 x 2 tex				
	Počet měření	Průměr	95 % IS střední hodnoty	Směrodatná odchylka
<i>Zweigle KG Reutlingen D310: Metoda přímá, předpětí: 200mN</i>				
Z_s [m ⁻¹]	30	739	(726;752)	37
<i>Zweigle KG Reutlingen D310: Metoda nepřímá s napínačem, předpětí: 20mN</i>				
Z_p [m ⁻¹]	30	858	(849 ; 867)	26
<i>Uster Tester IV-SX: Rychlost měření 400m/min, doba měření: 1min</i>				
U [%]	5	7,49	(7,33 ; 7,65)	0,18
CV [%]	5	9,43	(9,24; 9,62)	0,22
CV(1m) [%]	5	3,07	(2,64 ; 3,47)	0,46
CV(3m) [%]	5	2,59	(2,1 ; 3,08)	0,55
CV(10m) [%]	5	1,99	(1,44 ; 2,54)	0,62
Počet slabých míst -50% [km ⁻¹]	5	0	0	0
Počet silných míst +50% [km ⁻¹]	5	0	0	0
Nopky+200% [km ⁻¹]	5	2	(0 ; 7)	2,09
Chlupatost [-]	5	6,73	(6,65 ; 6,81)	0,1
<i>Instron 4411: Upínací délka 500mm, předpětí 250mN; rychlost průřezu 110mm/min</i>				
Poměrná pevnost [cN/tex]	50	26,25	(25,91; 26,59)	1,22
Pevnost [N]	50	6,56	(6,48 ;6,64)	0,30
Tažnost [%]	50	7,44	(7,36; 7,52)	0,29

Tab. 3 Polyester (PL)

100% polyester (PL) o jemnosti 25 x 2 tex				
	Počet měření	Průměr	95 % IS střední hodnoty	Směrodatná odchylka
<i>Zweigle KG Reutlingen D310: Metoda přímá, předpětí: 250mN</i>				
Z_s [m ⁻¹]	30	567	(558 ; 576)	24
<i>Zweigle KG Reutlingen D310: Metoda nepřímá s napínačem, předpětí: 30mN</i>				
Z_p [m ⁻¹]	30	784	(769 ; 799)	52
<i>Uster Tester IV-SX: Rychlost měření 400m/min, doba měření: 1min</i>				
U [%]	5	6,45	(6,33 ; 6,57)	0,14
CV [%]	5	8,11	(7,96 ; 8,26)	0,17
CV(1m) [%]	5	3,89	(3,71 ; 4,07)	0,21
CV(3m) [%]	5	2,86	(2,67 ; 3,05)	0,21
CV(10m) [%]	5	1,6	(1,56 ; 1,64)	0,05
Počet slabých míst -50% [km ⁻¹]	5	0	0	0
Počet silných míst +50% [km ⁻¹]	5	1	(0 ; 5)	1,37
Nopky+200% [km ⁻¹]	5	2	(0 ; 7)	3,26
Chlupatost [-]	5	8,39	(8,18;8,6)	0,24
<i>Instron 4411: Upínací délka 500mm, předpětí 250mN; rychlost příčniku 220mm/min</i>				
Poměrná pevnost [cN/tex]	50	59,61	(58,83 ; 60,39)	2,82
Pevnost [N]	50	14,90	(14,70 ;15,1)	0,71
Tažnost [%]	50	15,02	(14,89; 15,15)	0,46

Tab. 4 Polypropylen (PP)

100% polypropylen (PP) o jemnosti 25 x 2 tex				
	Počet měření	Průměr	95 % IS střední hodnoty	Směrodatná odchylka
<i>Zweigle KG Reutlingen D310: Metoda přímá, předpětí: 250mN</i>				
Z_s [m ⁻¹]	30	439	(432 ; 446)	19,424
<i>Zweigle KG Reutlingen D310: Metoda nepřímá s napínačem, předpětí: 30mN</i>				
Z_p [m ⁻¹]	30	612	(595 ; 629)	44,871
<i>Uster Tester IV-SX: Rychlost měření 400m/min, doba měření: 1min</i>				
U [%]	5	6,89	(6,79 ; 6,99)	0,080
CV [%]	5	8,69	(8,57 ; 8,81)	0,097
CV(1m) [%]	5	2,91	(2,79 ; 3,04)	0,101
CV(3m) [%]	5	2,22	(2,06 ; 2,38)	0,129
CV(10m) [%]	5	1,44	(1,2 ; 1,69)	0,196
Počet slabých míst -50% [km ⁻¹]	5	0,5	(0 ; 4)	1,118
Počet silných míst +50% [km ⁻¹]	5	4,5	(2 ; 12)	4,809
Nopky+200% [km ⁻¹]	5	9,5	(4 ; 17)	4,809
Chlupatost [-]	5	7,35	(7,09 ; 7,61)	0,210
<i>Instron 4411: Upínací délka 500mm, předpětí 250mN; rychlost příčniku 450mm/min</i>				
Poměrná pevnost [cN/tex]	50	28,32	(27,97 ; 28,67)	1,23
Pevnost [N]	50	14,16	(13,98 ; 14,34)	0,618
Tažnost [%]	50	28,55	(28,01; 29,08)	1,89

Tab. 5 Viskóza (VI)

100% viskóza (VI) o jemnosti 25 x 2 tex				
	Počet měření	Průměr	95 % IS střední hodnoty	Směrodatná odchylka
<i>Zweigle KG Reutlingen D310: Metoda přímá, předpětí: 250mN</i>				
Z_s [m ⁻¹]	30	440	(433 ; 447)	20
<i>Zweigle KG Reutlingen D310: Metoda nepřímá s napínačem, předpětí: 30mN</i>				
Z_p [m ⁻¹]	30	597	(586 ; 608)	31
<i>Uster Tester IV-SX: Rychlost měření 400m/min, doba měření: 1min</i>				
U [%]	5	7,33	(7,22 ; 7,44)	0,12
CV [%]	5	9,24	(9,11 ; 9,24)	0,15
CV(1m) [%]	5	2,69	(2,54 ; 2,84)	0,17
CV(3m) [%]	5	2,04	(1,88 ; 2,2)	0,18
CV(10m) [%]	5	1,39	(1,24 ; 1,54)	0,17
Počet slabých míst -50% [km ⁻¹]	5	0	0	0
Počet silných míst +50% [km ⁻¹]	5	1	(0 ; 5)	1,37
Nopky+200% [km ⁻¹]	5	1	(0 ; 5)	1,37
Chlupatost [-]	5	8,6	(8,51 ; 8,69)	0,1
<i>Instron 4411: Upínací délka 500mm, předpětí 250mN; rychlost příčnicku 120mm/min</i>				
Poměrná pevnost [cN/tex]	50	241,46	(238,09 ; 244,83)	12,17
Pevnost [N]	50	13,56	(13,37; 13,75)	0,68
Tažnost [%]	50	8,11	(7,99; 8,23)	0,44

3.1 Experimentální stanovení modulů pružnosti na základě zkoušky pevnosti

3.1.1 Analýza tahových křivek do přetrhu

U každého materiálu bylo realizováno 50 měření, z těchto padesáti realizovaných měření bylo náhodně vybráno dvacet tahových křivek a v tabulkovém kalkulátoru Excel byla metodou nejmenších čtverců proložena naměřenými daty přímka (viz. kapitola 2.1.3.2).

Výsledné hodnoty modulů pružnosti (směrnice regresní přímky) K_{NT} a koeficientů determinace R_{NT}^2 (dle vztahu 58) pro jednotlivé materiály jsou uvedeny v tabulce číslo 6.

Tab. 6 Statické moduly pružnosti K_{NT} stanovené jako směrnice regresní přímky a koeficienty determinace R^2_{NT}

PL				
	Počet měření	\bar{x}	95% IS	S
K_{NT} [N.m ⁻¹]	20	191	(188; 194)	7,7
R^2_{NT}	20	0,975420	(0,974887; 0,975953)	0,001216
CO				
	Počet měření	\bar{x}	95% IS	S
K_{NT} [N.m ⁻¹]	20	174	(172; 176)	5,5
R^2_{NT}	20	0,997280	(0,99706; 0,9975)	0,000502
PP				
	Počet měření	\bar{x}	95% IS	s
K_{NT} [N.m ⁻¹]	20	102	(100; 104)	5
R^2_{NT}	20	0,988875	(0,985501; 0,992249)	0,007698
VI				
	Počet měření	\bar{x}	95% IS	s
K_{NT} [N.m ⁻¹]	20	320	(317; 323)	7,4
R^2_{NT}	20	0,989910	(0,989683; 0,990137)	0,000518

3.1.2 Analýza tahových křivek do protažení 5 mm

Dále byly analyzovány deformační vlastnosti délkové textilie při deformacích do 5 mm.

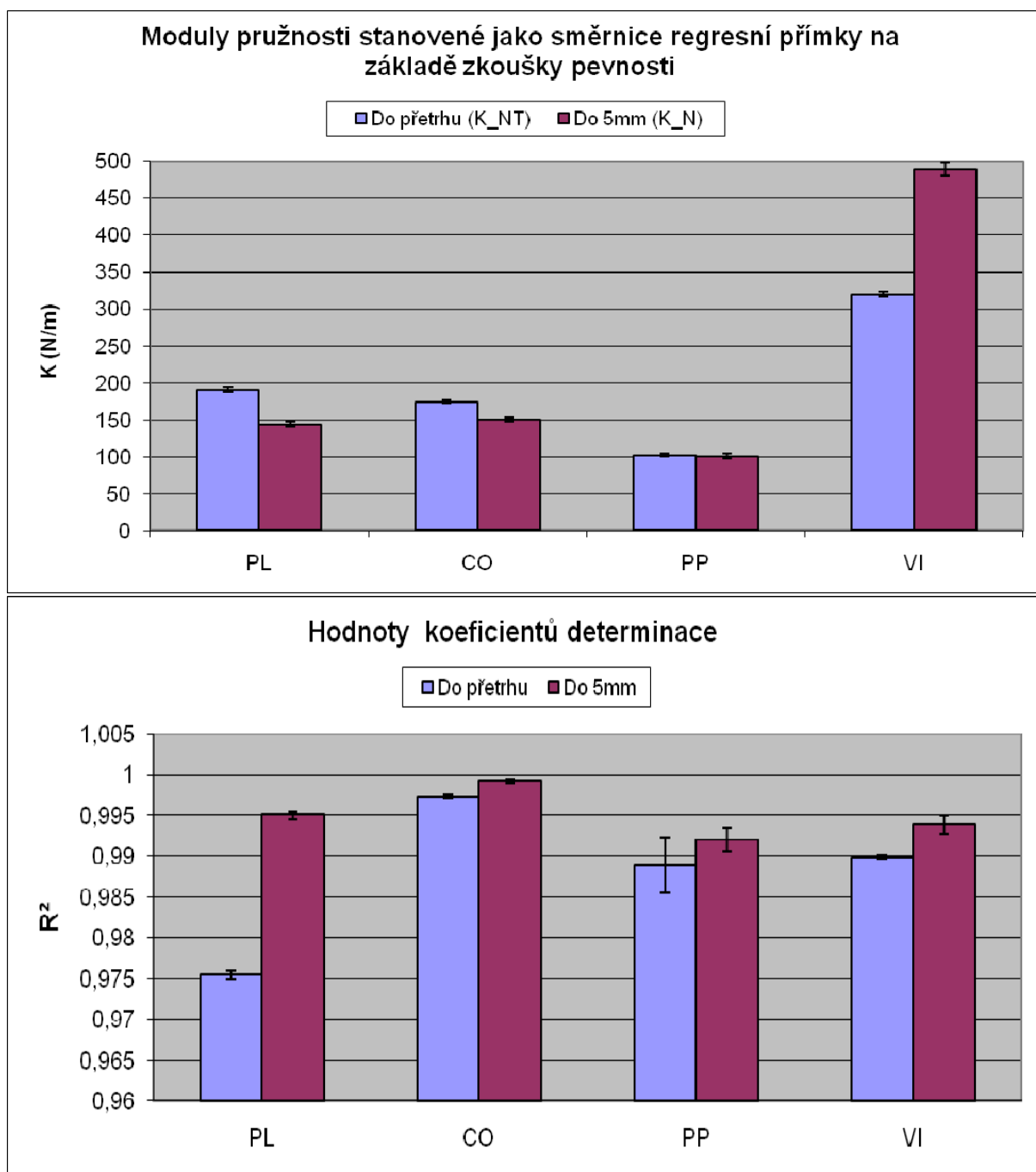
Z 20 náhodně vybraných tahových křivek byla vybrána pouze data, která odpovídala protažení nitě do 5 mm a těmito daty byla opět proložena regresní přímka (viz. kapitola 2.1.3.2).

Výsledné hodnoty modulů pružnosti (směrnice regresní přímky) K_N a koeficientů determinace R_N^2 jsou uvedeny v následující tabulce číslo 7.

Tab. 7 Statické moduly pružnosti K_N stanovené jako směrnice regresní přímky při deformaci do 5 mm a koeficienty determinace R^2_N

PL				
	Počet měření	\bar{x}	95% IS	S
K_N [N.m ⁻¹]	20	144	(140; 148)	8,8
R^2_N	20	0,995015	(0,994524; 0,995506)	0,001120
CO				
	Počet měření	\bar{x}	95% IS	s
K_N [N.m ⁻¹]	20	150	(147; 153)	5,9
R^2_N	20	0,999225	(0,99897; 0,99948)	0,000582
PP				
	Počet měření	\bar{x}	95% IS	S
K_N [N.m ⁻¹]	20	101	(98; 104)	7,3
R^2_N	20	0,991980	(0,990551; 0,993409)	0,003262
VI				
	Počet měření	\bar{x}	95% IS	S
K_N [N.m ⁻¹]	20	489	(480 ; 498)	20,3
R^2_N	20	0,993850	(0,992777; 0,994923)	0,002448

Výsledné hodnoty modulů pružnosti K (K_{NT} , K_N) a koeficientů determinace R^2 (R^2_{NT} , R^2_N) byly pro znázornění vyneseny do grafů na obr. 16.



Obr. 16¹ Výsledné hodnoty modulů pružnosti K (K_{NT} , K_N) a koeficientů determinace R^2 (R^2_{NT} , R^2_N) pro jednotlivé materiály

¹ V popisech kategorií jsou indexy odděleny pomocí podtržítka ($K_{NT} \sim K_{NT}$).

3.2 Stanovení dynamických modulů pružnosti

Na speciálním zařízení *VibTex* (viz. 2.1.3.1) byla realizována měření s jednotlivými textilními materiály při podmínkách, které jsou uvedeny v tabulkách 8, 9.

Tab. 8 Frekvence protažení 10 Hz

	Maximální protažení [mm]	Upínací délka [mm]		Předpětí [mN]	
	Průměr	Průměr	95% IS	Průměr	95% IS
PL	4,6	493	(492; 494)	196	(184; 208)
CO	4,6	493	(492; 494)	210	(195; 225)
PP	4,7	523	(520; 526)	207	(195; 219)
VI	2,7 ¹	496	(494; 498)	166	(153; 179)

¹V tomto případě byla nastavena nižší hodnota maximálního protažení z důvodu rozsahu snímače tahové síly v délkových textiliích (5 N). Při vyšších hodnotách maximálního protažení dochází k překročení rozsahu snímače.

Tab. 9 Frekvence protažení 100 Hz

	Maximální protažení [mm]	Upínací délka [mm]		Předpětí ² [mN]	
	Průměr	Průměr	IS 95%	Průměr	IS 95%
PL	3,0	492	(491; 493)	398	(383; 413)
CO	3,0	494	(493; 495)	405	(396; 414)
PP	3,0	498	(497; 499)	466	(448; 484)
VI	3,1	499	(497; 501)	479	(456; 502)

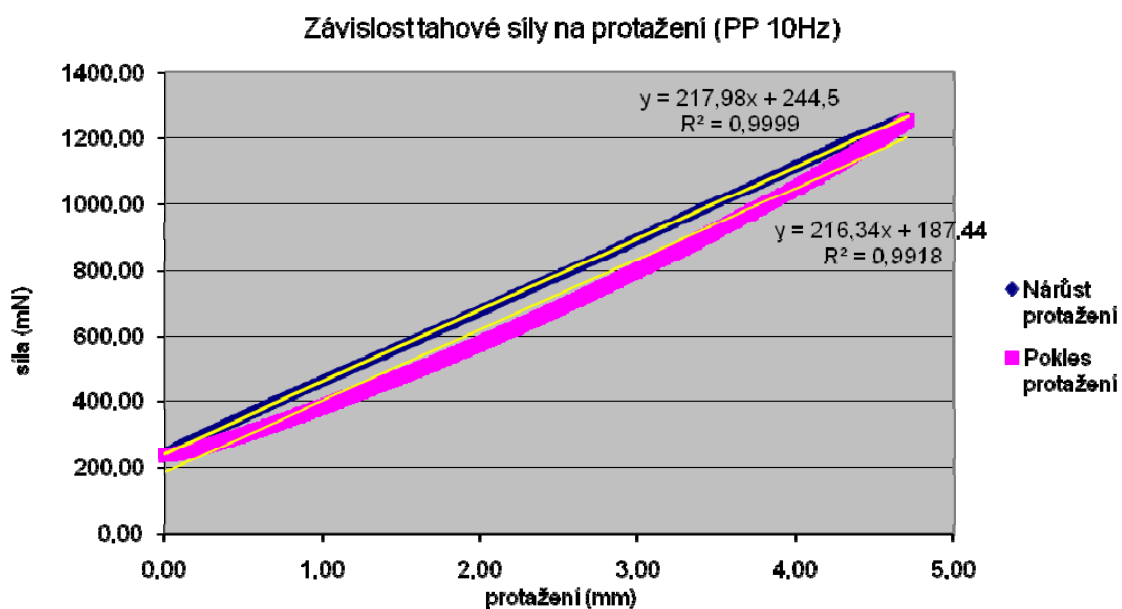
²Při frekvenci 100Hz je nutné nastavit vyšší hodnoty předpětí z důvodu eliminace vzniku příčných kmitů délkové textilie.

3.2.1 Experimentální stanovení modulů pružnosti jako směrnice regresní přímky

Způsob výpočtu modulů pružnosti jako směrnice regresní přímky je popsán v teoretické části (viz. kapitola 2.1.3.3.1).

Na zařízení *VibTex* (viz. 2.1.3.1) byla realizována měření s jednotlivými textilními materiály při podmínkách (viz. tab. 8, 9).

Takto realizovaná měření umožňují stanovit modul pružnosti jako směrnici regresní přímky při protahování ($y=K_N \cdot x+q$) i povolování nitě ($y=K_P \cdot x+q$) a příslušné koeficienty determinace R^2_N a R^2_P (obr. 17).



Obr. 17 Závislost tahové síly na protažení (PP, 10Hz)

Postupně bylo provedeno deset měření pro každý zkoumaný materiál a pro jednotlivé frekvence (10 Hz a 100 Hz). Výsledné hodnoty pro protahování i povolování nitě jsou uspořádány v následujících tabulkách (tab. 10, 11).

Tab. 10 Dynamické moduly pružnosti a koeficienty determinace při 10 Hz

PL				
	Nárůst protažení		Pokles protažení	
	K_N [N/m]	R_N^2	K_P [N/m]	R_P^2
\bar{x}	274	0,99611	272	0,97834
95% IS	(265;283)	(0,995733;0,996487)	(260;284)	(0,976825;0,979855)
s	18	0,000608	19	0,002445
CO				
	Nárůst protažení		Pokles protažení	
	K_N [N/m]	R_N^2	K_P [N/m]	R_P^2
\bar{x}	465	0,98956	455	0,95894
95% IS	(450;480)	(0,988615;0,990505)	(432;478)	(0,957036;0,960844)
s	24	0,001525	36	0,003072
PP				
	Nárůst protažení		Pokles protažení	
	K_N [N/m]	R_N^2	K_P [N/m]	R_P^2
\bar{x}	215	0,99986	213	0,98936
95% IS	(212;218)	(0,999817;1,00029)	(210;216)	(0,988489;0,990231)
s	4	0,00007	4	0,001406
VI				
	Nárůst protažení		Pokles protažení	
	K_N [N/m]	R_N^2	K_P [N/m]	R_P^2
\bar{x}	1004	0,98898	991	0,96736
95% IS	(991;1017)	(0,987927;0,990033)	(922;1060)	(0,964434;0,970286)
S	21	0,0017	112	0,004721

Tab. 11 Dynamické moduly pružnosti a koeficienty determinace při 100 Hz

PL				
	Nárůst protažení		Pokles protažení	
	K_N [N/m]	R_N^2	K_P [N/m]	R_P^2
\bar{x}	297	0,99964	296	0,99054
95% IS	(285;309)	(0,999547;0,999733)	(290;302)	(0,989926;0,991154)
s	23	0,000151	10	0,000991
CO				
	Nárůst protažení		Pokles protažení	
	K_N [N/m]	R_N^2	K_P [N/m]	R_P^2
\bar{x}	509	0,99944	502	0,97342
95% IS	(498;520)	(0,999356;0,999524)	(487;517)	(0,972596;0,974244)
S	18	0,000135	25	0,00133
PP				
	Nárůst protažení		Pokles protažení	
	K_N [N/m]	R_N^2	K_P [N/m]	R_P^2
\bar{x}	277	0,99802	278	0,99132
95% IS	(272;282)	(0,997751;0,998289)	(272;284)	(0,990915;0,991725)
S	8	0,000434	9	0,000653
VI				
	Nárůst protažení		Pokles protažení	
	K_N [N/m]	R_N^2	K_P [N/m]	R_P^2
\bar{x}	1004	0,98898	991	0,96736
95% IS	(991;1017)	(0,987927;0,990033)	(922;1060)	(0,964434;0,970286)
S	21	0,0017	112	0,004721

3.2.2 Experimentální stanovení modulů pružnosti poměrem amplitudy odezvy a amplitudy budící funkce

Způsob výpočtu modulů pružnosti poměrem amplitudy odezvy a amplitudy budící funkce je popsán v teoretické části (viz. kapitola 2.1.3.3.2).

Na zařízení *VibTex* (viz. 2.1.3.1) byla realizována měření s jednotlivými textilními materiály při podmínkách (viz. tab. 8, 9):

Postupně bylo provedeno deset měření pro každý zkoumaný materiál a pro jednotlivé frekvence (10 Hz a 100 Hz). Naměřené hodnoty byly zpracovány pomocí programu *VibTexSoft* (viz. 2.1.3.3.2), který určí dynamický modul pružnosti (dle vztahu 8), fázové posunutí mezi silou a protažením, tzv. ztrátový úhel (dle vztahu 19). Dále je stanoven elastický modul dle rovnice 20 a ztrátový modul dle rovnice 21. Příslušné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 12.

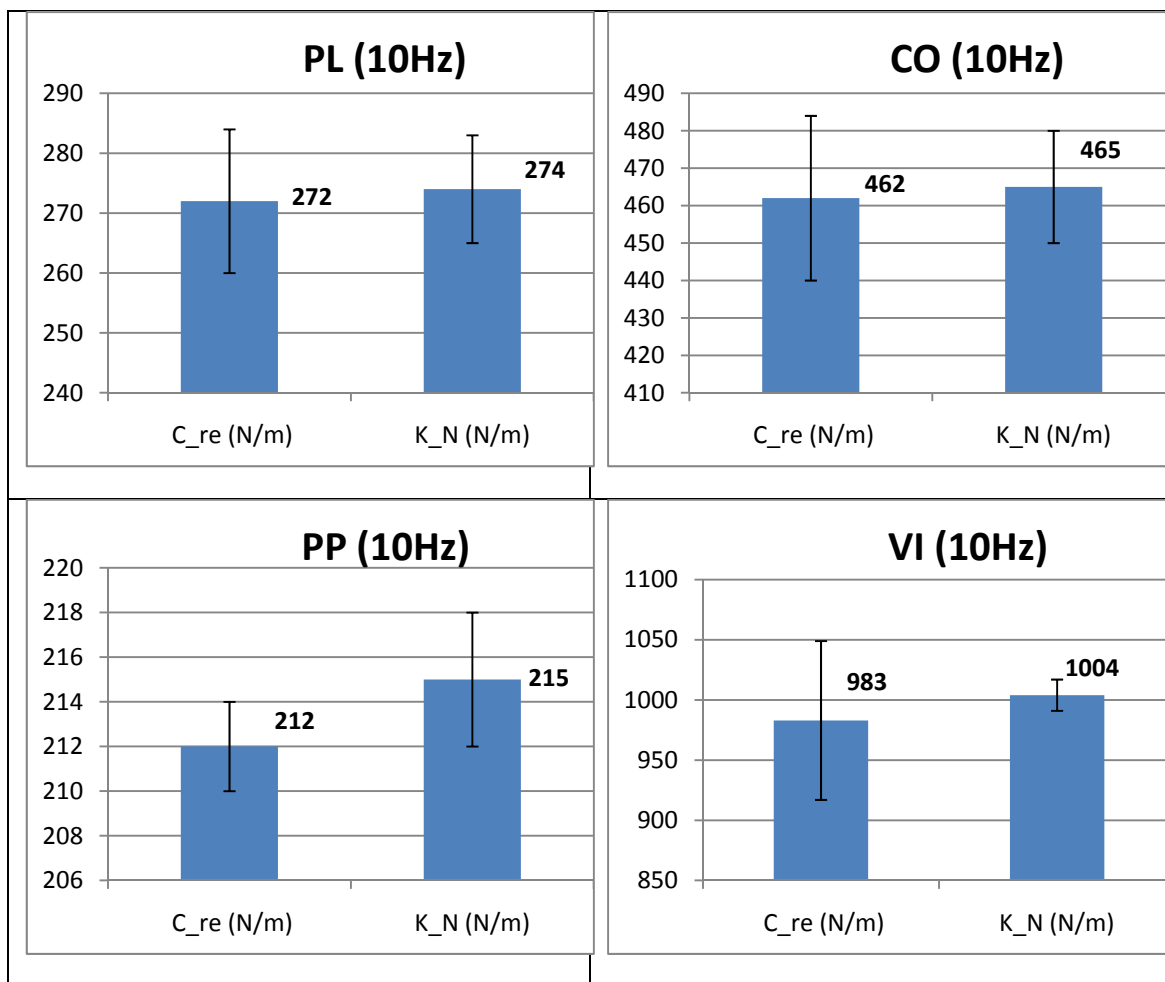
Tab. 12 Naměřené hodnoty pro frekvenci 10 Hz a 100 Hz

Frekvence protažení: 10 Hz , Teplota: 22°C, Relativní vlhkost: 40%, Počet měření: 10								
	Dynamický modul C [N/m]		Ztrátový úhel δ [°]		Elastický modul C_{RE} [N/m]		Ztrátový modul C_{IM} [N/m]	
	\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS
PL	273	(261;285)	5,0	(4,9;5,1)	272	(260;284)	23,7	(22,9;24,5)
CO	465	(443;487)	6,0	(5,9;6,1)	462	(440;484)	48,7	(46,8;50,6)
PP	213	(211;215)	6,0	(5,9;6,1)	212	(210;214)	22,0	(21,6;22,04)
VI	987	(921;1053)	4,5	(4,3;4,7)	983	(917;1049)	76,1	(74,1;78,1)
Frekvence protažení 100 Hz , Teplota: 22°C, Relativní vlhkost: 40%, Počet měření: 10								
	Dynamický modul C [N/m]		Ztrátový úhel δ [°]		Elastický modul C_{RE} [N/m]		Ztrátový modul C_{IM} [N/m]	
	\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS	\bar{x}	95% IS
PL	297	(291;303)	7,6	(7,4;7,8)	295	(289;301)	39,5	(38,7;40,3)
CO	513	(496;530)	9,6	(9,3;9,9)	504	(488;520)	85,4	(81,9;88,9)
PP	280	(275;285)	9,3	(9,0;9,6)	278	(273;283)	45,8	(44,4;47,2)
VI	1211	(1178;1244)	7,4	(7,1;7,7)	1201	(1168;1234)	155,2	(150,3;160,1)

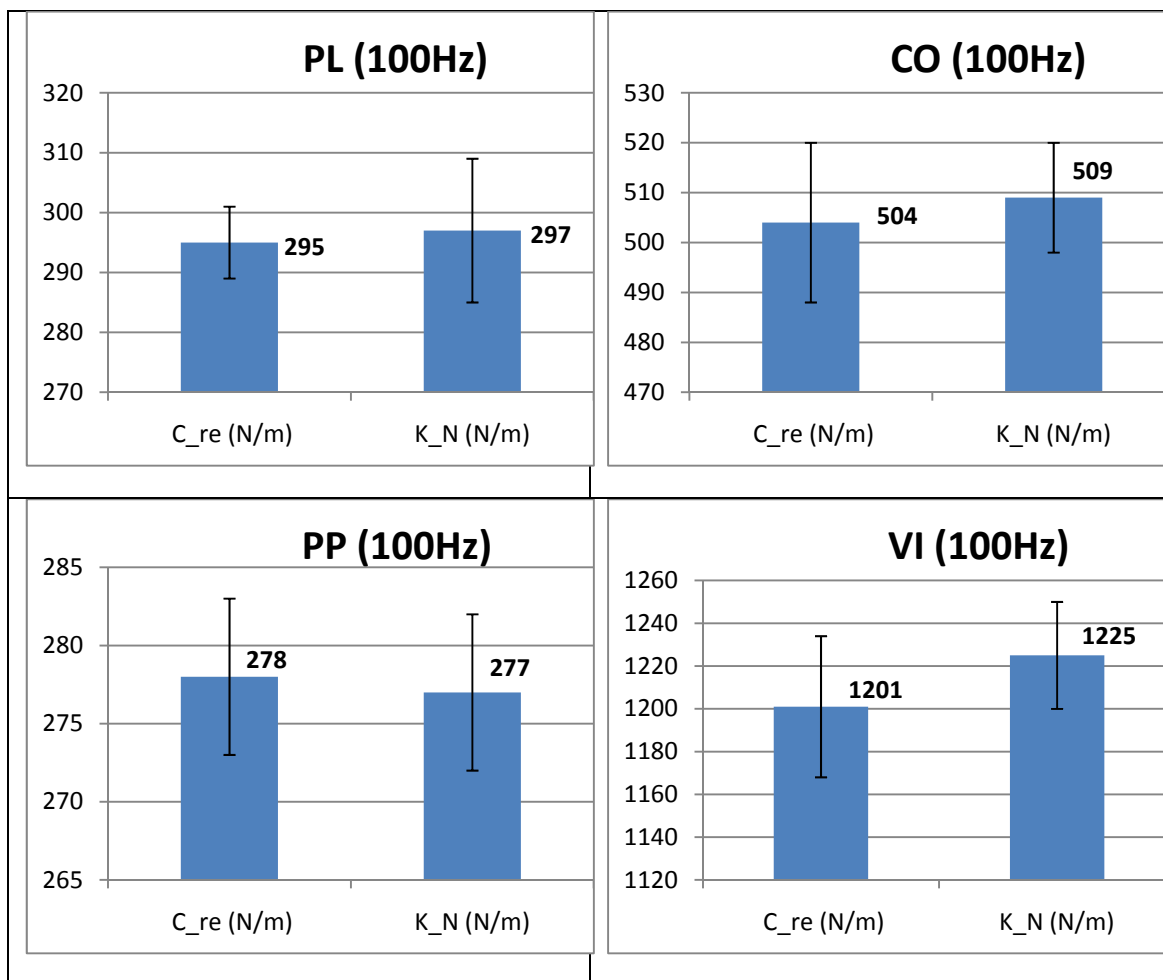
3.2.3 Vzájemné porovnání modulů pružnosti stanovených různým způsobem

V této části bude provedeno vzájemné porovnání modulů pružnosti, které byly stanoveny jako směrnice regresních přímek (K_N) dle tabulky 10,11 a modulů pružnosti, které byly stanoveny jako poměr amplitudy odezvy a amplitudy budící funkce (C_{Re}) dle tabulky 12.

Tyto hodnoty jsou znázorněny formou sloupcových grafů pro 10 Hz (obr. 18) a 100 Hz (obr. 19). Jsou zde uvedeny hodnoty elastických modulů pružnosti C_{Re} a hodnoty směrnic přímek pro nárůst protažení K_N .



Obr. 18 Vzájemné porovnání modulů pružnosti stanovených různým způsobem (10 Hz)



Obr. 19 Vzájemné porovnání modulů pružnosti stanovených různým způsobem (100Hz)

Diskuse

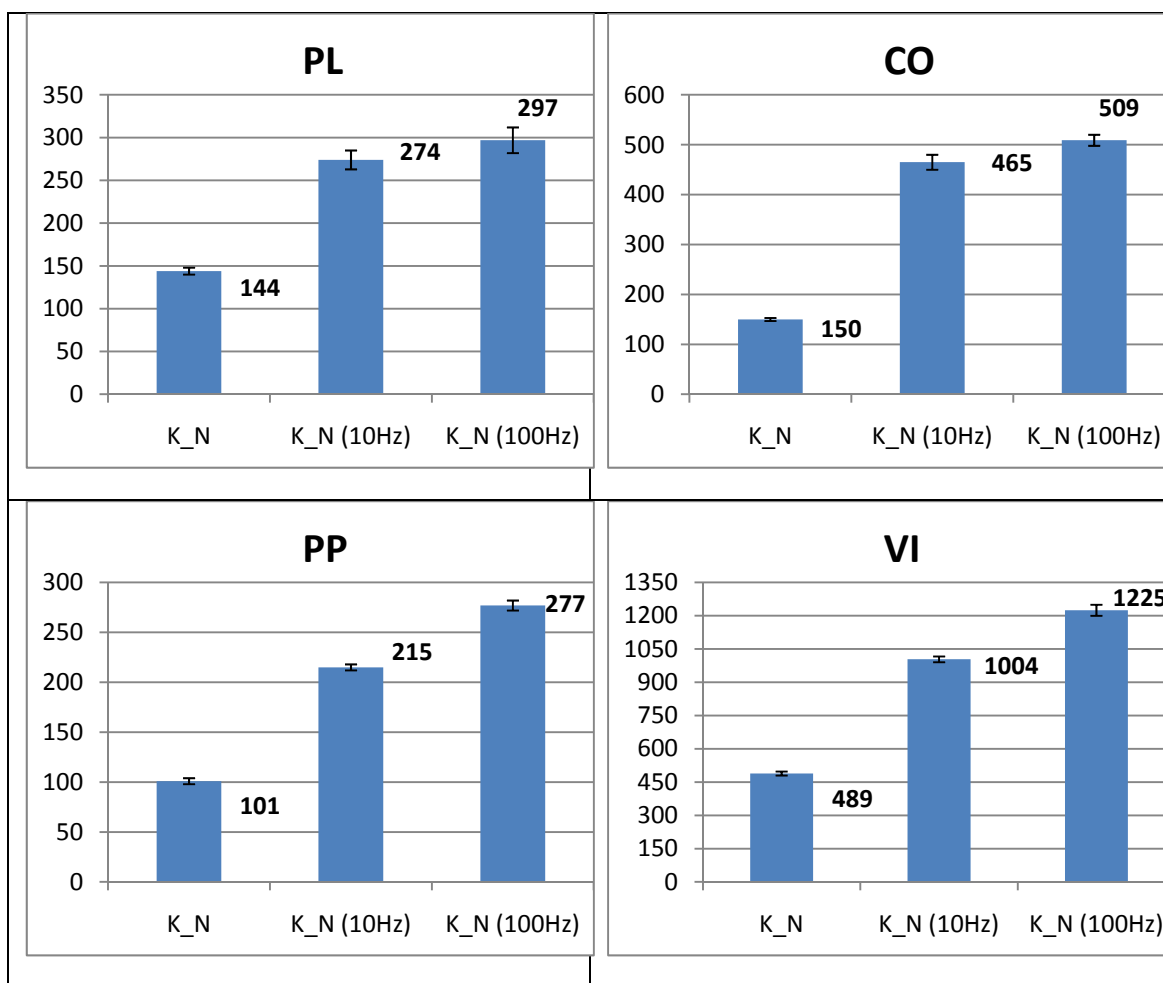
Z výše uvedených grafů je zřejmé, že hodnoty modulů pružnosti C_{Re} a K_N stanovených různým způsobem se u testovaných přízí a testovaných frekvencí výrazněji neliší. Proto je možné konstatovat, že pro stanovení modulů pružnosti mohou být použity oba zmíněné způsoby, tj. výpočet modulu pružnosti jako poměr amplitudy síly a protažení nebo výpočet modulu pružnosti jako směrnice regresní přímky v závislosti tahové síly na protažení.

3.3 Porovnání modulů pružnosti naměřených na zařízení *Instron* a *VibTex*

V této kapitole bude provedeno vzájemné porovnání modulů pružnosti stanovených na zařízení *Instron* při zkoušce pevnosti a modulů pružnosti stanovených na zařízení *VibTex* při cyklickém protahování s frekvencí 10 a 100 Hz.

V následujících grafech jsou znázorněny hodnoty modulů pružnosti K_N , které jsou stanoveny jako směrnice regresních přímek při protažení do 5 mm (viz. tabulka 7). Dále jsou v grafech znázorněny hodnoty modulů pružnosti při 10 Hz a 100 Hz (viz. Tabulka 10, 11), které jsou stanoveny jako směrnice regresních přímek v závislosti tahové síly na protažení (obr. 8) zjištěné na zařízení *VibTex*.

Výsledné hodnoty jsou zaznamenány ve sloupcových grafech (obr. 20).



Obr. 20 Porovnání modulů pružnosti naměřených na zařízení *Instron* a *VibTex*

Diskuse

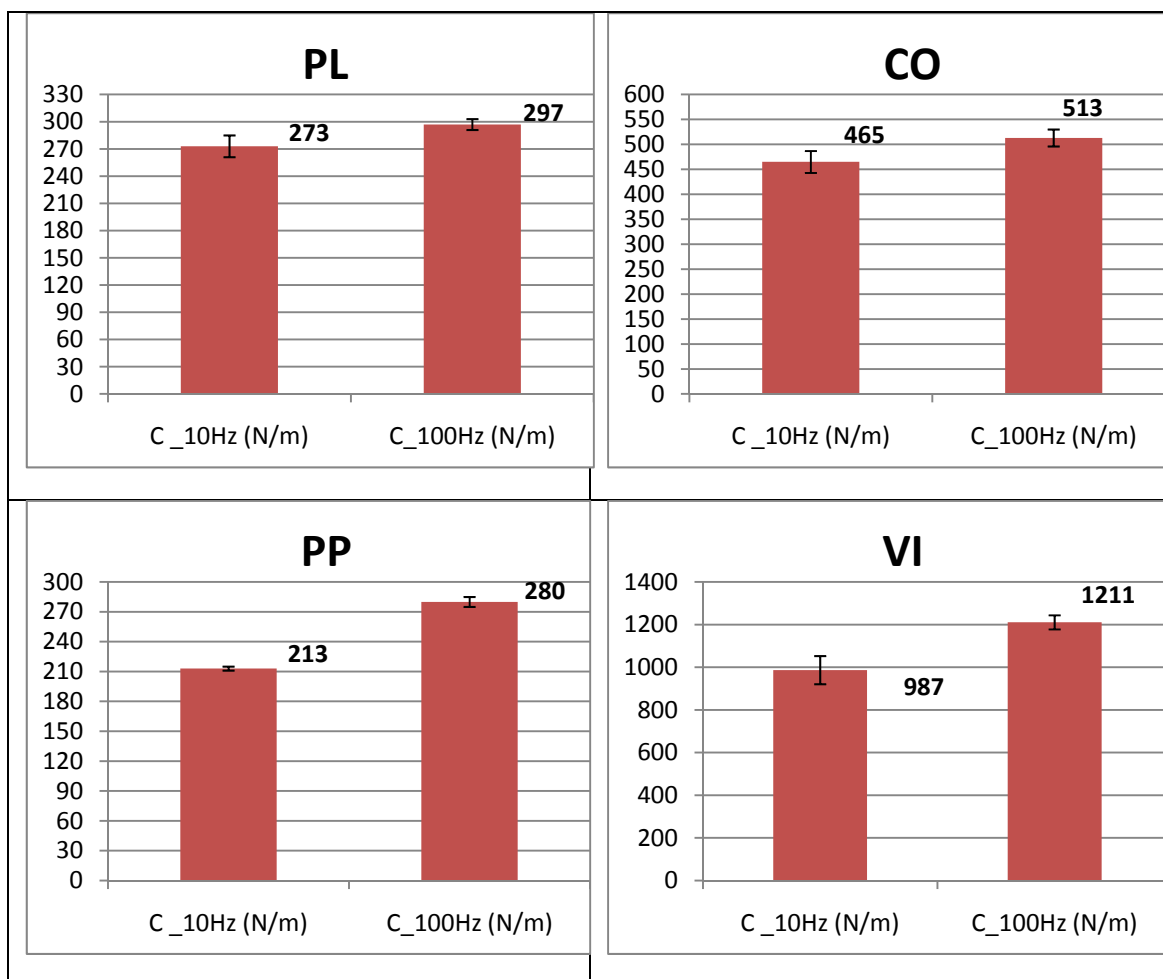
Z obr. 20 je patrné že, hodnoty modulů pružnosti stanovených jako směrnice regresní přímky na přístroji *Instron* (K_N) jsou nižší než hodnoty modulů pružnosti stanovených jako směrnice regresní přímky na zařízení *VibTex* (K_{N10Hz} , K_{N100Hz}). Intervaly spolehlivosti se nepřekrývají, z čehož plyne že, zjištěné rozdíly jsou statisticky významné. Tento jev je pravděpodobně způsoben reologickými vlastnostmi testovaných textilií.

3.4 Vliv frekvence protažení na dynamický modul pružnosti

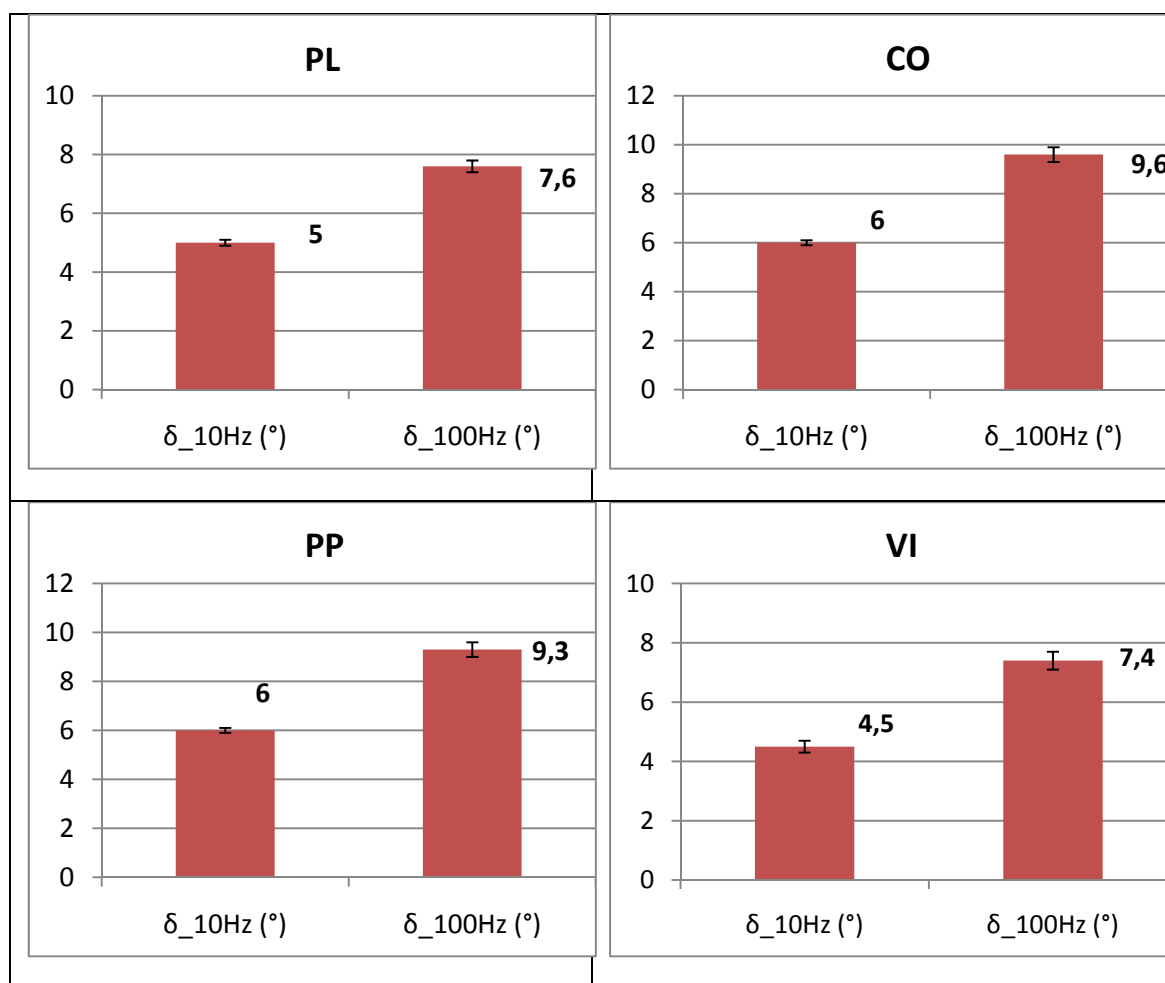
3.4.1 Porovnání dynamických modulů pružnosti a ztrátových úhlů

V této části budou porovnány výsledné hodnoty dynamických modulů pružnosti C [N/m] a ztrátových úhlů δ [°] u jednotlivých frekvencí 10 Hz a 100 Hz pro všechny testované příze (viz. tabulka 12).

Výsledné hodnoty jsou zaznamenány ve sloupcových grafech (obr. 21, 22).



Obr. 21 Výsledné hodnoty dynamických modulů pružnosti C [N/m]



Obr. 22 Výsledné hodnoty fázových posuvů δ (ztrátový úhel)

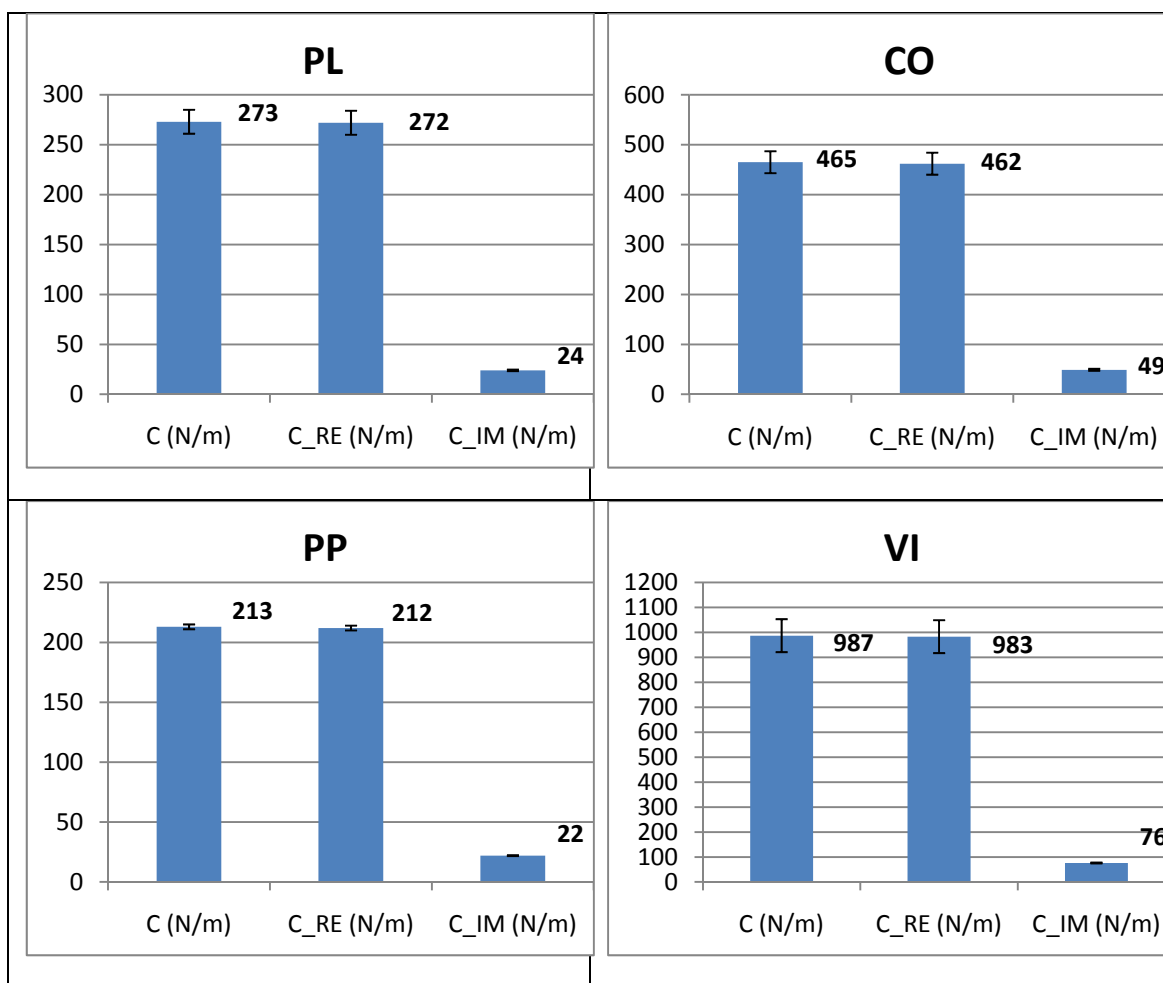
Diskuse

Z výše uvedených hodnot vyplývá, že při změně frekvence protažení z hodnoty 10 Hz na 100 Hz dochází k nárůstu dynamického modulu i ztrátového úhlu u všech testovaných přízí. Horní mez intervalu spolehlivosti dynamického modulu i ztrátového úhlu je při 10 Hz ve všech případech nižší než spodní mez intervalu spolehlivosti těchto veličin při 100 Hz. Proto je nárůst dynamického modulu i ztrátového úhlu při změně frekvence protažení z 10 Hz na 100 Hz statisticky významný. Tento jev je pravděpodobně způsoben reologickými vlastnostmi testovaných textilií.

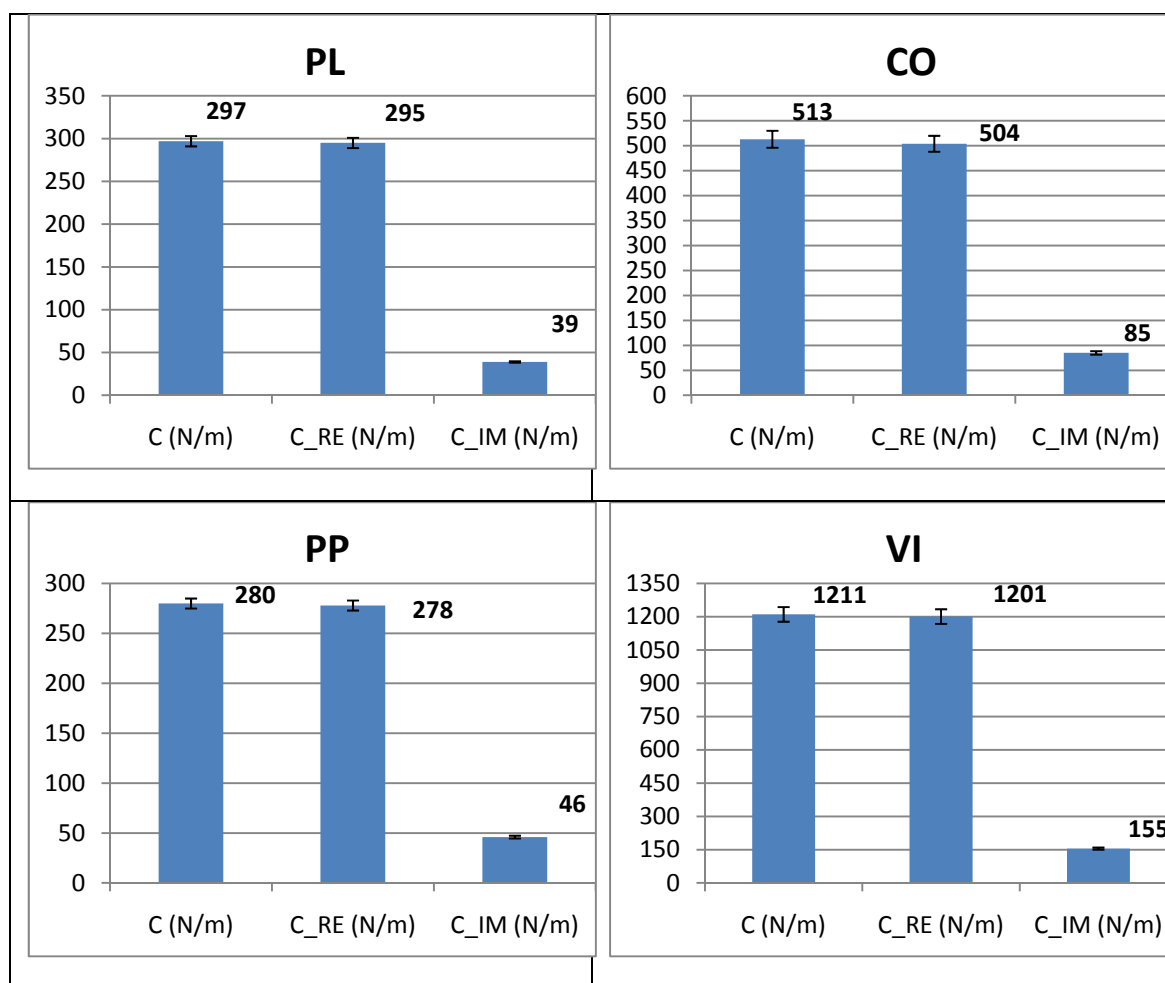
3.4.2 Porovnání dynamických, elastických a ztrátových modulů pružnosti

V této kapitole bude provedeno vzájemné porovnání dynamických, elastických a ztrátových modulů pružnosti u jednotlivých testovaných přízí pro 10 Hz a 100 Hz (viz. tabulka 12).

Výsledné hodnoty jsou zaznamenány ve sloupcových grafech (obr. 23, 24).



Obr. 23 Vzájemné porovnání dynamických, elastických a ztrátových modulů pružnosti (10 Hz)



Obr. 24 Vzájemné porovnání dynamických, elastických a ztrátových modulů pružnosti (100 Hz)

Diskuse

Z výše uvedených grafů je zřejmé, že ve všech případech je ztrátový modul výrazně nižší než modul elastický. Proto jsou hodnoty elastického modulu blízké hodnotám modulu dynamického.

4. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo prověřit vliv vysokofrekvenčního namáhání na deformační vlastnosti různých textilních materiálů. Postupně byly proměřeny příze: polyester, bavlna, viskóza a polypropylen na přístroji *Instron 4411* a na zařízení *VibTex*.

Na přístroji *Instron 4411* bylo realizováno padesát měření pro každou přízi. Jedním z výstupů přístroje *Instron 4411* jsou tahové křivky, tj. závislost tahové síly na protažení. Z výše zmiňovaných padesáti měření bylo náhodně vybráno dvacet tahových křivek a naměřenými daty byla metodou nejmenších čtverců proložena přímka. Byl vypočten modul pružnosti a koeficient determinace, který vyjadřuje „míru linearity“ deformačních vlastností příze až do přetrhu. Dále byly analyzovány deformační vlastnosti příze při deformacích do 5 mm. Byl vypočten koeficient determinace a modul pružnosti příze při její deformaci do 5 mm.

Na speciálním zařízení *VibTex* bylo realizováno deset měření pro každou testovanou přízi při frekvenci 10 Hz a 100 Hz. Byly použity dva způsoby pro stanovení modulů pružnosti na základě dat zjištěných při cyklickém namáhání na přístroji *VibTex*. Stanovení modulu pružnosti jako směrnice regresní přímky: Jedním z výstupů přístroje *VibTex* je závislost tahové síly na protažení při protahování i povolování nitě. Takto realizovaná měření umožňují stanovit modul pružnosti jako směrnici regresní přímky při protahování i povolování nitě. Dále stanovení modulu pružnosti poměrem amplitudy odezvy a amplitudy budící funkce: Stanovení modulů pružnosti poměrem amplitudy odezvy a amplitudy budící funkce bylo provedeno pomocí programu *VibTexSoft*.

Vzájemně byly porovnány moduly pružnosti, které byly stanoveny jako směrnice regresních přímek s moduly pružnosti, které byly stanoveny jako poměr amplitudy odezvy a amplitudy budící funkce. Hodnoty modulů pružnosti stanovených různým způsobem se u testovaných přízí a testovaných frekvencí výrazněji neliší. Proto je možné konstatovat, že pro stanovení modulu pružnosti mohou být použity oba zmíněné způsoby, tj. výpočet modulu pružnosti jako poměr amplitudy síly a protažení nebo výpočet modulu pružnosti jako směrnice regresní přímky v závislosti tahové síly na protažení.

Dále byly porovnávány moduly pružnosti naměřené na přístroji *Instron* a na zařízení *VibTex*. Z provedeného experimentu bylo zjištěno, že hodnoty modulů pružnosti stanovené jako směrnice regresní přímky na přístroji *Instron* jsou nižší než hodnoty modulů pružnosti stanovené jako směrnice regresní přímky na zařízení *VibTex*. Intervaly spolehlivosti se nepřekrývají, z čehož plyne, že zjištěné rozdíly jsou statisticky významné.

V další části diplomové práce byl prověřován vliv frekvence protažení na dynamický modul pružnosti. V této části byly porovnány výsledné hodnoty dynamických modulů pružnosti C [N/m] a ztrátových úhlů δ [°] u jednotlivých frekvencí 10 Hz a 100 Hz pro všechny testované příze. Ze zjištěných hodnot vyplývá, že při změně frekvence protažení z hodnoty 10 Hz na 100 Hz dochází k nárůstu dynamického modulu i ztrátového úhlu u všech testovaných přízí. Horní mez intervalu spolehlivosti dynamického modulu i ztrátového úhlu je při 10 Hz ve všech případech nižší než spodní mez intervalu spolehlivosti těchto veličin při 100 Hz. Proto je nárůst dynamického modulu i ztrátového úhlu při změně frekvence protažení z 10 Hz na 100 Hz statisticky významný. Nakonec byl porovnán dynamický, elastický a ztrátový modul pružnosti. Ve všech případech byl ztrátový modul výrazně nižší než modul elastický. Proto byly hodnoty elastického modulu blízké hodnotám modulu dynamického.

Rozdíly dynamických modulů pružnosti zjištěné při různých frekvencích protahování jsou pravděpodobně způsobeny reologickými vlastnostmi testovaných textilií (viz. 2.1.4).

5. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Bílek, M., Tumajer P.: Behaviour of Textiles under High Frequency stress. Acta Universitatis Cibiniensis Technical Series, vol. LVIII, 2009 s. 8-14, Rumunsko, ISSN 1583-7149.
- [2] Kovačič, V.: Zkoušení textilií I, skripta TU v Liberci, 2002
http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20080228/ZKB_1_dil.pdf
- [3] Košková, B.: Struktura a vlastnosti vláken, VŠ strojní a textilní v Liberci, Liberec 1989
- [4] Kvasnica, J., Havránek, A., Lukáč, P., Sprušil, B.: Mechanika, nakladatelství Akademie věd České Republiky, Praha 2004
- [5] Ursíny, P.: Předení I., skripta TU v Liberci, 2001
- [6] Bílek, M., Tumajer, P.: Mechanical properties of textile materials. Acta Universitatis Cibiniensis Technical Series, vol. LIX, 2009 s. 8-14, Rumunsko, ISSN 1583-7149.
- [7] Rektorys, K.: Přehled užití matematiky II, Praha 1995
- [8] Kovačič, V.: Zkoušení textilií II, skripta TU v Liberci, 2002
- [9] Aramanovič, I.G., Lunc, G.L., El'sgol'c, L.E.: Funkcie komplexnej premennej operátorový počet teória stability, Praha 1973
- [10] Tumajer, P., Bílek, M., Strašáková, P.: Mutual action force between weaving machine and textile material, X. International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms, Proceedings, pages: 665-670, 2. 9.- 4. 9.2008, Technical University of Liberec – Department of Textile Machines Design, Liberec, Česká republika, 2008. ISBN: 978-80-7372-370-5, UT ISI:000259441500108, WOS

- [11] Ursíny, P.; Bílek, M.; Tumajer, P.; Moučková, E.: Simulation des Textilmaterialverhaltens während des Webprozesses, In. 12. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung Innovation mit textilen Strukturen, pp. 314 – 321, September 2009, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz 2009, Německo. ISBN: 978-3-9812554-3-0
- [12] Blažej, A.: Vlastnosti textilních vláken, Vydavatelstvo technickém a ekonomickej literatúry, Bratislava, 1982
- [13] Plander I.: Dynamické vlastnosti viskoelastických materiálov a ich meranie, Vydavateľstvo Slovenskej Akadémie Vied, Bratislava, 1964

Přílohy

Seznam příloh:

Příloha č. 1	Statistické zpracování dat ze zařízení <i>VibTex</i>
Příloha č. 2	Statistické zpracování dat z přístroje <i>Instron 4411</i>

Příloha č. 1

a) Statistické zpracování dat ze zařízení *VibTex* CO 10Hz

Číslo měření	Maximální protažení (mm)	Minimální síla (mN)	Maximální síla (mN)	Komplexní modul (N/m)	Fázové posunutí (°)	Elastický modul (N/m)	Ztrátový modul (N/m)	Upínací délka (mm)
1	4,55	242,5	2639	526,1	5,84	523,37	53,54	490
2	4,55	234,5	2501	499,15	5,88	496,53	51,09	492
3	4,55	222,2	2152	424,07	6,44	421,39	47,6	494
4	4,55	213,2	2377	474,68	6,05	472,03	50,01	493
5	4,55	169,5	2155	436,64	5,84	434,37	44,45	495
6	4,55	185,9	2167	435,21	6,11	432,74	46,32	493
7	4,5	176,7	2073	417,3	6,12	414,93	44,48	494
8	4,55	226,1	2492	498,36	5,92	495,69	51,43	493
9	4,55	214,7	2334	465,94	6,08	463,32	49,33	495
10	4,55	216,4	2357	470,42	5,98	467,86	49,02	494
\bar{x}	4,55	210,2	2324	464,79	6,026	462,22	48,727	493,3
S	0,02	24,64	185	36,18	0,1809	36,077	3,0100	1,49
95% IS	0,009	15,27	115	22,42	0,1121	22,360	1,865	0,93

b) Statistické zpracování dat ze zařízení *VibTex* CO 100Hz

Číslo měření	Maximální protažení (mm)	Minimální síla (mN)	Maximální síla (mN)	Komplexní modul (N/m)	Fázové posunutí (°)	Elastický modul (N/m)	Ztrátový modul (N/m)	Upínací délka (mm)
1	3,07	410,76	2047,28	533,41	10,14	525,08	93,95	494
2	3,05	384,76	1824,67	472,72	9,53	466,20	78,28	493
3	3,07	429,41	2096,54	543,92	9,53	536,41	90,07	495
4	3,04	395,50	1828,06	471,39	10,07	464,13	82,42	494
5	3,03	401,74	1964,76	516,02	10,01	508,16	89,73	495
6	3,04	387,23	1860,99	484,79	10,15	477,20	85,47	493
7	3,08	411,57	1995,27	513,52	8,62	507,72	76,97	496
8	3,00	418,64	2000,71	528,02	9,02	507,17	80,51	492
9	3,03	421,73	2039,69	533,98	9,58	526,53	88,88	492
10	3,00	393,15	1987,78	531,01	9,48	523,75	87,50	492
\bar{x}	3,04	405,45	1964,58	512,88	9,61	504,24	85,38	493,6
S	0,03	15,29	95,23	26,92	0,51	26,18	5,62	1,43
95% IS	0,02	9,48	59,02	16,68	0,31	16,23	3,49	0,89

c) Statistické zpracování dat ze zařízení *VibTex* PL 10Hz

Číslo měření	Maximální protažení (mm)	Minimální síla (mN)	Maximální síla (mN)	Komplexní modul(N/m)	Fázové posunutí (°)	Elastický modul (N/m)	Ztrátový modul (N/m)	Upínací délka (mm)
1	4,54	195,28	1454,43	277,28	5,08	276,19	24,57	492
2	4,56	222,06	1640,8	311,47	4,51	310,5	24,51	494
3	4,55	186,83	1348,53	255,26	5,03	254,28	22,39	494
4	4,56	173,25	1354,08	259,24	5,14	258,2	23,23	495
5	4,56	183,37	1316,56	248,72	5,08	247,75	22,04	493
6	4,56	184,19	1387,3	263,78	4,77	262,87	21,92	492
7	4,55	193,5	1452,28	276,84	5,01	275,78	24,16	492
8	4,55	204,95	1467,72	277,53	5,21	276,38	25,22	491
9	4,56	183,03	1399,72	266,99	5,11	265,94	23,76	491
10	4,56	232,17	1578,2	295,38	4,91	294,29	25,28	493
\bar{x}	4,56	195,86	1439,96	273,25	4,99	272,22	23,71	492,7
S	0,01	18,69	103,24	19,00	0,21	18,98	1,26	1,34
95% IS	0,00438	11,58	63,99	11,78	0,13	11,76	0,78	0,83

d) Statistické zpracování dat ze zařízení *VibTex* PL 100Hz

Číslo měření	Maximální protažení (mm)	Minimální síla (mN)	Maximální síla (mN)	Komplexní modul (N/m)	Fázové posunutí (°)	Elastický modul (N/m)	Ztrátový modul (N/m)	Upínací délka (mm)
1	3,02	377,77	1284,77	300,43	7,85	297,61	41,06	490
2	3,05	409,11	1316,81	297,9	7,54	295,32	39,1	492
3	3,07	404,35	1285,41	287,08	7,75	284,46	38,71	491
4	3,02	377,02	1256,62	291,74	7,83	289,02	39,76	492
5	3	434,02	1364,89	310,19	7,12	307,8	38,43	492
6	3	367,19	1245,37	293,12	7,34	290,71	37,46	494
7	3,05	426,85	1331,45	296,49	7,53	293,94	38,84	491
8	3,02	372,15	1243,12	288,02	8,11	285,14	40,62	492
9	3,07	389,82	1359,6	316,3	7,49	313,6	41,24	494
10	3,04	418,86	1303,35	291,43	7,77	288,76	39,39	494
\bar{x}	3,03	397,71	1299,14	297,27	7,63	294,64	39,46	492,2
S	0,03	24,18	44,20	9,49	0,29	9,53	1,22	1,40
95% IS	0,016	14,99	27,40	5,88	0,18	5,91	0,75	0,87

e) Statistické zpracování dat ze zařízení *VibTex* VI 10Hz

Číslo měření	Maximální protažení (mm)	Minimální síla (mN)	Maximální síla (mN)	Komplexní modul(N/m)	Fázové posunutí (°)	Elastický modul (N/m)	Ztrátový modul (N/m)	Upínací délka (mm)
1	2,73	219,52	3673,57	1265,68	3,74	1262,99	82,57	500
2	2,74	162,1	3001,89	1037,17	4,32	1034,22	78,22	499
3	2,73	163,34	2657,75	913,37	4,83	910,12	76,95	495
4	2,74	172,95	2848	977,37	4,54	974,31	77,28	496
5	2,74	149,69	2703,93	932,55	4,36	929,84	70,94	496
6	2,73	165,31	2660,47	912,64	4,83	909,4	76,88	495
7	2,74	152,74	2650,48	913,25	4,58	910,33	72,99	495
8	2,74	168,7	2856,75	981,4	4,43	978,47	75,83	492
9	2,73	139,51	2704,96	938,35	4,5	935,46	73,6	493
10	2,74	162,7	2888,73	994,9	4,36	992,03	75,59	495
\bar{x}	2,74	165,66	2864,65	986,67	4,45	983,72	76,09	495,6
S	0,01	21,33	308,37	106,50	0,31	106,61	3,20	2,41
95% IS	0,00320	13,22	191,12	66,01	0,19	66,07	1,98	1,50

f) Statistické zpracování dat ze zařízení *VibTex* VI 100Hz

Číslo měření	Maximální protažení (mm)	Minimální síla (mN)	Maximální síla (mN)	Komplexní modul(N/m)	Fázové posunutí (st.)	Elastický modul (N/m)	Ztrátový modul (N/m)	Upínací délka (mm)
1	3,02	432,94	3781,57	1107,72	7,68	1097,78	148,06	500
2	3,07	517,51	4240,8	1213,59	7,57	1203,01	159,89	500
3	3,06	442,12	3965,85	1150,79	7,31	1141,43	146,48	495
4	3,05	448,77	4320,65	1271,13	7,09	1261,4	156,98	505
5	3,05	465,56	4073,83	1184,98	7,29	1175,4	150,39	500
6	3,01	493,15	4095,23	1197,1	7,48	1186,92	155,8	500
7	3,08	530,64	4428,96	1267,33	7,14	1257,51	157,48	500
8	3	491,41	4124,67	1210,28	8,22	1197,84	173,08	500
9	3,04	522,08	4352,94	1260,57	7,13	1250,83	156,39	496
10	3,07	443,67	4275,23	1248,47	6,76	1239,79	146,98	495
\bar{x}	3,05	478,79	4165,97	1211,20	7,37	1201,19	155,15	499,1
S	0,03	36,79	196,81	53,56	0,40	53,64	7,95	3,03
95% IS	0,02	22,80	121,98	33,20	0,25	33,25	4,93	1,88

g) Statistické zpracování dat ze zařízení *VibTex* PP 10Hz

Číslo měření	Maximální protažení (mm)	Minimální síla (mN)	Maximální síla (mN)	Komplexní modul(N/m)	Fázové posunutí (st.)	Elastický modul (N/m)	Ztrátový modul (N/m)	Upínací délka (mm)
1	4,7	236,39	1263,42	218,47	5,53	217,45	21,07	530
2	4,71	175,99	1169,35	211,08	6,21	209,85	22,82	530
3	4,71	196,89	1189,1	210,61	6,09	209,42	22,36	520
4	4,7	236,37	1241,98	213,87	5,83	212,76	21,73	520
5	4,71	182,21	1159,69	207,58	6,01	206,44	21,73	520
6	4,69	214,45	1196,73	209,44	5,84	208,35	21,32	520
7	4,7	209,79	1224,65	215,88	5,96	214,72	22,4	520
8	4,67	200,99	1193,35	212,41	5,9	211,28	21,84	530
9	4,69	202,34	1210,5	215,05	6,01	213,87	22,5	520
10	4,7	212,87	1213,27	212,72	6,09	211,52	22,56	520
\bar{x}	4,70	206,83	1206,20	212,71	5,95	211,57	22,03	523
S	0,01	19,89	31,68	3,24	0,19	3,26	0,58	4,83
95% IS	0,0076	12,33	19,63	2,01	0,12	2,02	0,36	2,99

h) Statistické zpracování dat ze zařízení *VibTex* PP 100Hz

Číslo měření	Maximální protažení (mm)	Minimální síla (mN)	Maximální síla (mN)	Komplexní modul(N/m)	Fázové posunutí (st.)	Elastický modul (N/m)	Ztrátový modul (N/m)	Upínací délka (mm)
1	3,05	457,26	1286,57	271,64	9,13	268,2	43,09	495
2	3,05	481,41	1351,22	284,9	8,81	281,54	43,66	495
3	3,02	494,33	1354,97	285,36	9,26	281,64	45,91	500
4	3,01	437,38	1290,09	282,82	9,58	278,87	47,08	495
5	3,03	485,97	1351,62	285,6	9,37	281,79	46,48	496
6	2,97	469,71	1283,23	274,1	10,21	269,75	48,6	497
7	2,98	414,25	1217,76	269,54	9,38	265,94	43,92	499
8	2,98	450,74	1265,17	273,57	9,35	269,94	44,45	500
9	2,98	449,86	1277,58	277,85	9,39	274,13	45,35	500
10	3,01	514,38	1391,83	291,13	8,7	287,77	44,04	500
\bar{x}	3,01	465,53	1307,00	279,65	9,32	275,96	45,26	497,7
S	0,03	29,55	53,01	7,26	0,42	7,33	1,75	2,31
95% IS	0,02	18,31	32,86	4,50	0,26	4,55	1,09	1,43

Příloha č. 2

a) Statistické zpracování dat CO z přístroje *Instron 4411*

	Protažení do přetruhu			Protažení do 5mm		
Číslo měření	Směrnice	Úsek na svislé ose	Koeficient determinace R^2	Směrnice	Úsek na svislé ose	Koeficient determinace R^2
1	185,23	173,61	0,997400	161,67	366,69	0,999900
2	173,11	39,63	0,997500	148,77	225,46	0,999100
3	176,99	44,54	0,996600	147,25	267,53	0,999700
4	175,32	33,376	0,997000	152,9	230,13	0,999600
5	164,17	91,446	0,997600	149,47	217,96	0,999500
6	167,39	42,616	0,996600	142,25	248,24	0,999600
7	168,85	171,4	0,997400	155,68	321,29	0,999900
8	171,22	155,8	0,997700	156,83	299,8	0,999900
9	177,95	-29,289	0,995900	143,8	213,56	0,998700
10	179,65	22,183	0,997800	154,57	203,44	0,998700
11	171,11	102,05	0,997400	155,01	252,77	0,999700
12	172,26	86,052	0,997600	150,26	248,91	0,999300
13	163,99	56,015	0,998200	143,76	195,22	0,998500
14	172,24	36,324	0,997200	145,93	221,02	0,998800
15	182,78	21,819	0,997300	152,31	235,33	0,998900
16	173,84	60,641	0,997100	148,45	235,9	0,999100
17	176,19	58,042	0,997300	155,98	223,13	0,999600
18	175,69	51,943	0,997300	147,57	241,09	0,999400
19	172	22,958	0,997000	141,47	221,27	0,999000
20	176,43	-26,629	0,997700	139,33	187,53	0,997600
\bar{x}	173,82	60,73	0,997280	149,66	242,81	0,999225
S	5,47	56,18	0,000502	5,92	43,38	0,000582
95% IS	2,4	24,62	0,000220	2,596	19,01	0,000255

b) Statistické zpracování dat PL z přístroje Instron 4411

	Protažení do přetruhu			Protažení do 5mm		
Číslo měření	Směrnice	Úsek na svislé ose	Koeficient determinace R ²	Směrnice	Úsek na svislé ose	Koeficient determinace R ²
1	187,49	-460,57	0,975700	146,08	286,62	0,995800
2	190,53	-540,28	0,976900	144,08	371,8	0,996900
3	203,31	-504,54	0,973500	166,97	350,15	0,997000
4	200,14	-695,53	0,976400	143,6	322,34	0,995600
5	190,44	-575,18	0,975800	139,2	237,24	0,993400
6	202,91	-640,77	0,976200	153,44	252,34	0,994700
7	187,96	-482,74	0,978000	148,69	252,39	0,995500
8	176,93	-458,24	0,975400	137,34	273,94	0,994400
9	190,05	-504,69	0,975700	145,62	252,43	0,994900
10	196,34	-602,94	0,975600	146,18	256,16	0,994100
11	194,69	-639,98	0,974200	139,91	243,88	0,994600
12	193,82	-661,16	0,975500	134,06	234,52	0,993300
13	189,85	-674,12	0,977400	133,34	225,14	0,994600
14	181,46	-529,13	0,974200	134,43	277,16	0,994400
15	180,26	-439,86	0,975700	137,17	276,08	0,994200
16	189,34	-573,3	0,974200	143,83	257,42	0,995500
17	203,6	-543,4	0,973800	158,49	335,48	0,995900
18	185,05	-414,23	0,975500	144,07	298,39	0,995100
19	195,43	-710,9	0,974000	135,12	269,66	0,993500
20	184,33	-415,08	0,974700	153,97	313,69	0,996900
\bar{x}	191,20	-553,33	0,975420	144,28	279,34	0,995015
s	7,66	94,40	0,001216	8,80	40,7	0,001120
95% IS	3,36	41,37	0,000533	3,86	17,84	0,000491

c) Statistické zpracování dat VI z přístroje *Instron 4411*

	Protažení do přetrhu			Protažení do 5mm		
Číslo měření	Směrnice	Úsek na svislé ose	Koeficient determinace R^2	Směrnice	Úsek na svislé ose	Koeficient determinace R^2
1	316,2	1503,6	0,990100	529,58	282,35	0,997800
2	319,82	1191,8	0,989900	499,54	244,25	0,996600
3	311,41	1272,1	0,989800	491,72	243,32	0,996700
4	311,91	1031,1	0,990500	452,11	67,492	0,990000
5	310,5	1157,3	0,989500	459,59	82,47	0,989600
6	331,26	1376,6	0,990600	522,11	213,15	0,995800
7	330,28	1271,8	0,989000	512,69	93,253	0,993000
8	329,3	1111,9	0,990200	486,77	115,96	0,992500
9	316,99	1197	0,990100	476,28	108,8	0,992000
10	309,84	1288,4	0,989600	490,88	171,91	0,994700
11	312,51	1183,2	0,989100	472,02	107,8	0,991700
12	312,96	1134,1	0,989600	476,31	123,29	0,993300
13	318,49	1414,8	0,989000	497,5	160,81	0,994100
14	321,68	1137	0,990300	461,85	129,13	0,991200
15	332,44	1164,4	0,990500	487,16	182,79	0,993700
16	320	1219,3	0,989900	490,98	292,9	0,997500
17	320,51	1259,7	0,990500	488,26	175,18	0,994000
18	328,1	1129,7	0,990600	478,95	84,465	0,991400
19	318,23	1356,1	0,989600	501,09	177,17	0,995000
20	325,84	1343,2	0,989800	511,26	227,97	0,996400
\bar{x}	319,91	1237,16	0,989910	489,33	164,22	0,993850
s	7,41	117,4	0,000518	20,30	68,54	0,002448
95% IS	3,25	51,45	0,000227	8,89	30,04	0,001073

d) Statistické zpracování dat PP z přístroje *Instron 4411*

Číslo měření	Protažení do přetrhu			Protažení do 5mm		
	Směrnice	Úsek na svislé ose	Koeficient determinace R^2	Směrnice	Úsek na svislé ose	Koeficient determinace R^2
1	97,734	715,87	0,991700	100,44	243,72	0,990300
2	103,2	759,5	0,991700	103,63	259,92	0,993500
3	110,59	778,13	0,993100	115,57	274	0,993800
4	98,137	744,47	0,990300	93,163	234,79	0,987200
5	97,272	779,83	0,989300	93,754	223,99	0,986900
6	104,47	776,69	0,990900	101,29	282,67	0,993000
7	103,2	942,06	0,987600	105,9	238,76	0,987700
8	108,89	689,81	0,991700	95,376	243,39	0,987100
9	103,39	538,45	0,994200	87,835	234,04	0,992100
10	104,65	869,79	0,990600	108,39	300,12	0,996100
11	105,74	737,85	0,992400	104,74	235,56	0,994000
12	103,7	625,96	0,994100	96,728	289,21	0,992200
13	90,158	1029,6	0,983500	94,229	290,74	0,992800
14	95,344	719,39	0,990700	90,353	232,55	0,992600
15	104,83	957,63	0,986600	98,934	246,12	0,986000
16	96,174	1086,3	0,958600	112,47	271,86	0,995100
17	104,14	834,91	0,988700	98,638	241,53	0,993500
18	102,97	708,35	0,994100	106,01	340,05	0,995100
19	105,32	814,35	0,992300	106,01	340,05	0,995100
20	96,679	1042,1	0,985400	104,81	304,83	0,995500
\bar{x}	101,83	807,55	0,988875	100,91	266,39	0,991980
s	5,04	142,59	0,007698	7,31	35,35	0,003262

95% IS	2,21	62,49	0,003374	3,20	15,49	0,001429
---------------	------	-------	----------	------	-------	----------